

ISSN 2413-5577

№ 1

Январь – Март

2023

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря



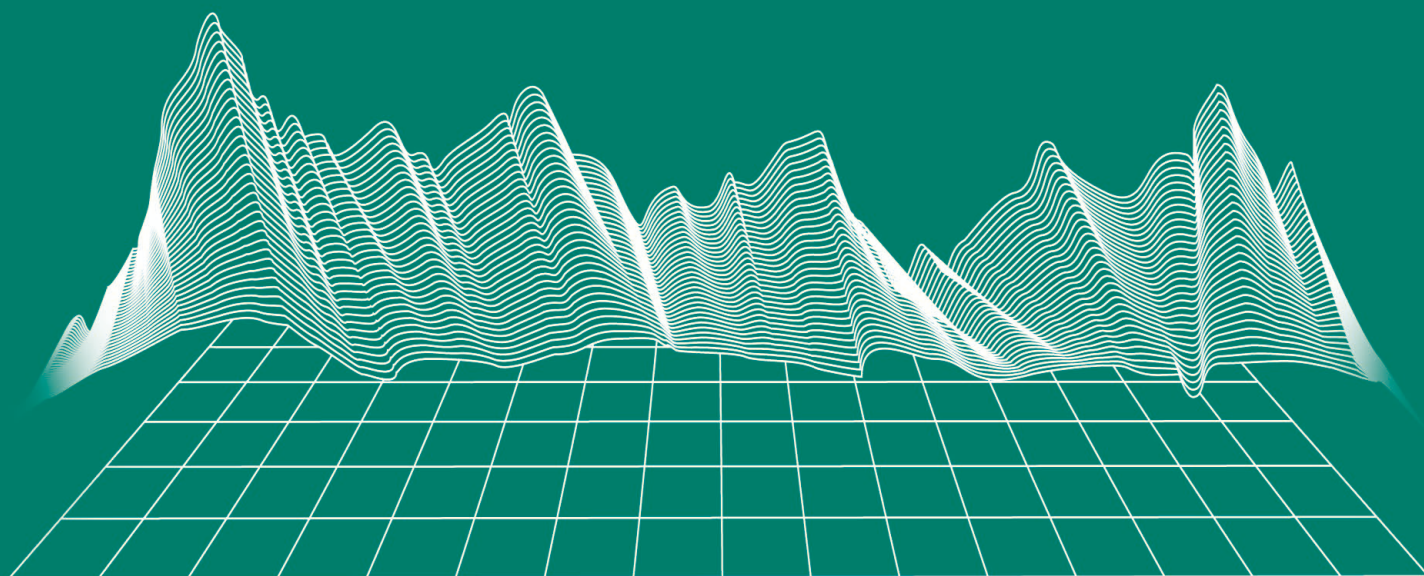
Ecological Safety of Coastal
and Shelf Zones of Sea

No. 1

January – March

2023

ecological-safety.ru



ISSN 2413-5577

№ 1, 2023

Январь – Март

Выходит 4 раза в год

16+

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИБРЕЖНОЙ И ШЕЛЬФОВОЙ ЗОН МОРЯ

Научно-теоретический журнал

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Морской гидрофизический институт РАН»

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», группа научных специальностей:

- 1.6.14 – Геоморфология и палеография (географические науки),
- 1.6.17 – Океанология (географические науки, физико-математические науки, технические науки),
- 1.6.18 – Науки об атмосфере и климате (географические науки, физико-математические науки)
- 1.6.20 – Геоинформатика, картография (географические науки),
- 1.6.21 – Геоэкология (географические науки).

Издание находится под научно-методическим руководством Отделения наук о Земле РАН.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС77-73714 от 21.09.2018 г. и Эл № ФС77-82679 от 21 января 2022 г.).

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Индексируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ) и в DOAJ.

Журнал размещен в каталоге научной периодики РИНЦ на платформе научной электронной библиотеки eLibrary.ru, Киберленинка.

Плата за публикацию статей не взимается.

Электронный адрес: ecology-safety@mhi-ras.ru

Сайт журнала: <http://ecological-safety.ru>

Адрес учредителя, издателя и редакции:
299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2

Телефон, факс: +7 (8692) 54-57-16

No. 1, 2023
January – March

Publication frequency:
Quarterly

16+

ECOLOGICAL SAFETY OF COASTAL AND SHELF ZONES OF SEA

Scientific and theoretical journal

FOUNDER AND PUBLISHER:
Federal State Budget Scientific Institution
Federal Research Centre
“Marine Hydrophysical Institute of RAS”

Journal is on the list of peer reviewed academic journals of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation, where one may publish main research results of a Ph.D. thesis in the following field:

- 1.6.14 – Geomorphology and paleography (geographical sciences),
- 1.6.17 – Oceanology (geographical sciences, physical and mathematical sciences, technical sciences),
- 1.6.18 – Atmosphere and Climate Sciences (geographical sciences, physical and mathematical sciences,),
- 1.6.20 – Geoinformatics and cartography (geographical sciences),
- 1.6.21 – Geoecology (geographical sciences).

Journal is under the scientific and methodological guidance of the Earth Sciences Department of the Russian Academy of Sciences.

Journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (registration number ПИ № ФС77-73714 of 21 September 2018 and ЭЛ № ФС77-82679 of 21 January 2022.)

Journal coverage: The Russian Federation, other countries.

The Journal is indexed in Russian Science Citation Index (RSCI), Directory of Open Access Journals (DOAJ).

Journal is in the catalog of scientific periodicals of the RSCI on the platform of the scientific electronic library eLibrary.ru, Cyberleninka.

There is no fee for publishing articles.

e-mail: ecology-safety@mhi-ras.ru

website: <http://ecological-safety.ru>

Founder, Publisher and Editorial Office address:
2, Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russia

Phone, fax: + 7 (8692) 54-57-16

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Горячкин Юрий Николаевич** – главный редактор, главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID ID: 0000-0002-2807-201X (Севастополь, Россия)
- Рябушко Виталий Иванович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ «ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН», главный научный сотрудник, д. б. н., ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Севастополь, Россия)
- Совга Елена Евгеньевна** – заместитель главного редактора, ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Севастополь, Россия)
- Фомин Владимир Владимирович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Севастополь, Россия)
- Хмара Татьяна Викторовна** – ответственный секретарь, младший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, Scopus Author ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Севастополь, Россия)
- Белокопытов Владимир Николаевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6602809060, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Севастополь, Россия)
- Бердников Сергей Владимирович** – председатель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Бондур Валерий Григорьевич** – директор ФГБНУ НИИ «АЭРОКОСМОС», вице-президент РАН, академик РАН, д. т. н., ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Москва, Россия)
- Васечкина Елена Федоровна** – заместитель директора ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., ResearcherID: P-2178-2017 (Севастополь, Россия)
- Гертман Исаак** – глава департамента Израильского океанографического и лимнологического исследовательского центра, руководитель Израильского морского центра данных, к. г. н., ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Хайфа, Израиль)
- Демьшев Сергей Германович** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ResearcherID: C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Севастополь, Россия)
- Дианский Николай Ардальевич** – главный научный сотрудник МГУ им. М. В. Ломоносова, доцент, д. ф.-м. н., ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Москва, Россия)
- Дулов Владимир Александрович** – заведующий лабораторией ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Севастополь, Россия)
- Егоров Виктор Николаевич** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, академик РАН, профессор, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Севастополь, Россия)
- Ефимов Владимир Васильевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: P-2063-2017 (Севастополь, Россия)
- Залесный Владимир Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ИВМ РАН, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Москва, Россия)
- Зацепин Андрей Георгиевич** – руководитель лаборатории ФГБУН ИО им. П.П. Ширшова РАН, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Москва, Россия)
- Кныш Василий Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., Researcher ID: B-3603-2018 (Севастополь, Россия)
- Коновалов Сергей Карпович** – директор ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Севастополь, Россия)
- Коротаев Геннадий Константинович** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: K-3408-2017 (Севастополь, Россия)
- Косьян Рубен Дереникович** – главный научный сотрудник ЮО ИО РАН, профессор, д. г. н., ORCID ID: 0000-0003-0788-6644 (Геленджик, Россия)
- Кузнецов Александр Сергеевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, к. т. н., ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Севастополь, Россия)
- Ли Михаил Ен Гон** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Севастополь, Россия)
- Малахова Людмила Васильевна** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, к. б. н., ResearcherID: E-9401-2016, ORCID ID: 0000-0001-8810-7264 (Севастополь, Россия)
- Матишов Геннадий Григорьевич** – заместитель академика-секретаря Отделения наук о Земле РАН – руководитель Секции океанологии, физики атмосферы и географии, научный руководитель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, научный руководитель ФГБУН ММБИ КНЦ РАН, академик РАН, д. г. н., профессор, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Мотыжев Сергей Владимирович** – главный научный сотрудник СевГУ, д. т. н., ResearcherID: G-2784-2014, ORCID ID: 0000-0002-8438-2602 (Севастополь, Россия)
- Празукин Александр Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, д. б. н., Researcher ID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Севастополь, Россия)
- Самодуров Анатолий Сергеевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: V-8642-2017 (Севастополь, Россия)
- Трухчев Димитър Иванов** – старший научный сотрудник Института океанологии БАН, профессор, д. ф.-м. н. (Варна, Болгария)
- Шапиро Наум Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: A-8585-2017 (Севастополь, Россия)

EDITORIAL BOARD

- Yuri N. Goryachkin** – Editor-in-Chief, Chief Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID 0000-0002-2807-201X (Sevastopol, Russia)
- Vitaliy I. Ryabushko** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Sevastopol, Russia)
- Elena E. Sovga** – Deputy Editor-in-Chief, Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Fomin** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Sevastopol, Russia)
- Tatyana V. Khmara** – Executive Editor, Junior Research Associate of FSBSI FRC MHI, Scopus ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir N. Belokopytov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6602809060, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Sevastopol, Russia)
- Sergey V. Berdnikov** – Chairman of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Rostov-on-Don, Russia)
- Valery G. Bondur** – Director of FSBSI Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, vice-president of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Moscow, Russia)
- Elena F. Vasechkina** – Deputy Director of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), ResearcherID: P-2178-2017 (Sevastopol, Russia)
- Isaac Gertman** – Head of Department of Israel Oceanographic and Limnological Research Institute, Head of Israel Marine Data Center, Ph.D. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Haifa, Israel)
- Sergey G. Demyshev** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Sevastopol, Russia)
- Nikolay A. Diansky** – Chief Research Associate of Lomonosov Moscow State University, associate professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Moscow, Russia)
- Vladimir A. Dulov** – Head of Laboratory of FSBSI FRC MHI, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Sevastopol, Russia)
- Victor N. Egorov** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, academician of RAS, professor, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Efimov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: P-2063-2017 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir B. Zalesny** – Leading Research Associate of FSBSI Institute of Numerical Mathematics of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Moscow, Russia)
- Andrey G. Zatsepin** – Head of Laboratory of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Moscow, Russia)
- Vasilii V. Knysh** – Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: B-3603-2018 (Sevastopol, Russia)
- Sergey K. Konovalov** – Director of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Sevastopol, Russia)
- Gennady K. Korotaev** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: K-3408-2017 (Sevastopol, Russia)
- Ruben D. Kosyan** – Chief Research Associate of Southern Branch of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, professor, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0003-0788-6644 (Gelendzhik, Russia)
- Alexander S. Kuznetsov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Ph.D. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Sevastopol, Russia)
- Michael E. Lee** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor, ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Sevastopol, Russia)
- Ludmila V. Malakhova** – Leading Research Associate of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Ph.D. (Biol.), ResearcherID: E-9401-2016, ORCID: 0000-0001-8810-7264 (Sevastopol, Russia)
- Gennady G. Matishov** – Deputy Academician – Secretary of Earth Sciences Department of RAS, Head of Section of Oceanology, Physics of Atmosphere and Geography, Scientific Supervisor of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Scientific Supervisor of FSBSI Murmansk Marine Biological Institute KSC of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), professor, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Rostov-on-Don, Russia)
- Sergey V. Motyzhev** – Chief Research Associate of Sevastopol State University, Dr.Sci. (Tech.), ResearcherID: G-2784-2014, ORCID ID: 0000-0002-8438-2602 (Sevastopol, Russia)
- Alexander V. Prazukin** – Leading Research Associate of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Sevastopol, Russia)
- Anatoly S. Samodurov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: V-8642-2017 (Sevastopol, Russia)
- Dimitar I. Trukhehev** – Institute of Metal Science, equipment, and technologies “Academician A. Balevski” with Center for Hydro- and Aerodynamics at the Bulgarian Academy of Sciences, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor (Varna, Bulgaria)
- Naum B. Shapiro** – Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: A-8585-2017 (Sevastopol, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

№ 1. 2023

Январь – Март, 2023

<i>Ефимов В. В., Яровая Д. А., Барабанов В. С.</i> Численное моделирование апвеллинга у Южного берега Крыма 24–25 сентября 2013 года.....	6
<i>Цыганова М. В., Лемешко Е. М., Рябцев Ю. Н.</i> Влияние апвеллинга на развитие речного плюма в прибрежной зоне северо-западного шельфа Черного моря на основе численного моделирования	20
<i>Ефремова Т. В. Горячкин Ю. Н.</i> Морфодинамика севавтопольских бухт под воздействием антропогенной деятельности.....	31
<i>Лемешко Е. Е.</i> Межгодовая изменчивость режимов циркуляции вод Северного Ледовитого океана.....	48
<i>Совга Е. Е., Котельянец Е. А.</i> Влияние содержания органического вещества в донных отложениях акваторий Крыма с интенсивным водообменом на накопление цинка, хрома и никеля	65
<i>Вареник А. В., Мыслина М. А., Тарасевич Д. В.</i> Атмосферное поступление силикатов в Крыму и факторы, влияющие на него	77
<i>Рябушко В. И., Щуров С. В., Ковригина Н. П., Чепыженко А. И.</i> Гидролого-гидрохимический режим озера Донузлав (Западный Крым, Черное море) по результатам экспедиций 2019 года.....	91
<i>Ломакин П. Д., Завьялов Д. Д.</i> Поле концентрации окрашенного растворенного органического вещества и его связь с соленостью в открытых водах Азовского моря.....	104
<i>Лисицкая Е. В., Болтачева Н. А.</i> Таксономический состав многощетинковых червей района мидийно-устричной фермы (Черное море, Севастополь).....	113
<i>Подольская М. С., Ткачук А. А., Андреева А. Ю., Кладченко Е. С., Челебиева Э. С., Мосунов А. А.</i> Влияние бикомпонентных наночастиц ZnO-ZnFe ₂ O ₄ на гемоциты средиземноморской мидии (<i>Mytilus galloprovincialis</i>) в условиях эксперимента <i>in vitro</i>	124
<i>Гайский П. В., Козлов И. Е.</i> Термопрофилемер для измерения вертикального распределения температуры в верхнем 100-метровом слое моря и его испытания в Арктическом бассейне	137

CONTENTS

№ 1. 2023

January – March, 2023

<i>Efimov V. V., Yarovaya D. A., Barabanov V. S.</i> Numerical Modelling of Upwelling near the South Coast of Crimea on 24–25 September 2013.....	6
<i>Tsyganova M. V., Lemeshko E. M., Ryabtsev Yu. N.</i> Influence of Upwelling on River Plume Development in the Coastal Zone of the North-Western Black Sea Shelf Based on Numerical Modelling.....	20
<i>Efremova T. V., Goryachkin Yu. N.</i> Morphodynamics of the Sevastopol Bays under Anthropogenic Impact.....	31
<i>Lemeshko E. E.</i> Interannual Variability of Water Circulation Regimes in the Arctic Ocean	48
<i>Sovga E. E., Kotelyanets E. A.</i> Influence of Organic Matter Content in Bottom Sediments in Crimean Water Areas with Intensive Water Exchange on Zinc, Chromium, and Nickel Accumulation.....	65
<i>Varenik A. V., Myslina M. A., Tarasevich D. V.</i> Atmospheric Input of Silica in Crimea and Factors Affecting it.....	77
<i>Ryabushko V. I., Shchurov S. V., Kovrigina N. P., Chepyzhenko A. I.</i> Hydrological, Hydrochemical Conditions of Lake Donuzlav (Western Crimea, Black Sea) based on the Results of Expeditions in 2019	91
<i>Lomakin P. D., Zavyalov D. D.</i> The Field of Colored Dissolved Organic Matter Content and its Relationship with Salinity in the Open Water of the Sea of Azov.....	104
<i>Lisitskaya E. V., Boltachova N. A.</i> Taxonomic Composition of Polychaete Worms in the Mussel-Oyster Farm Area (the Black Sea, Sevastopol).....	113
<i>Podolskaya M. S., Tkachuk A. A., Andreyeva A. Yu., Kladchenko E. S., Chelebieva E. S., Mosunov A. A.</i> Effect of Bicomponent ZnO-ZnFe ₂ O ₄ Nanoparticles on Mediterranean Mussel (<i>Mytilus galloprovincialis</i>) Hemocytes under <i>in vitro</i> Conditions	124
<i>Gaisky P. V., Kozlov I. E.</i> Thermoprofilemeter for Measuring the Vertical Temperature Distribution in the Upper 100-Meter Layer of the Sea and its Testing in the Arctic Basin	137

Численное моделирование апвеллинга у Южного берега Крыма 24–25 сентября 2013 года

В. В. Ефимов, Д. А. Яровая *, В. С. Барабанов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: darik777@mhi-ras.ru

Аннотация

При помощи совместной мезомасштабной модели море – атмосфера *NOW (NEMO-OASIS-WRF)* с разрешением 2 км изучен один из случаев ветрового прибрежного апвеллинга в Черном море у Южного берега Крыма 24–25 сентября 2013 г. Модель *NOW* успешно воспроизвела резкое понижение температуры поверхности моря на 10 °С в течение двух суток. Повышенное пространственное разрешение при моделировании позволило выделить особенности апвеллинга, связанные с рельефом и очертаниями береговой линии. В частности, выделены мелкомасштабные области понижения температуры там, где ветер направлен вправо вдоль берега, например над морем вблизи гор Южного берега Крыма. В то же время там, где прибрежный ветер имеет другое направление, апвеллинг отсутствует, например в северо-западной части Каркинитского залива, на побережье севернее Севастополя, а также на азовском побережье. Показано наличие в море вертикальной ячейки циркуляции, связанной с апвеллингом: подъем сезонного термоклина вблизи берега, отток теплой воды в квазиоднородном слое и опускание на расстоянии ~ 30–50 км от берега. Обнаружена суточная периодичность в изменении прибрежного течения, связанная с влиянием бризовой циркуляции: в дневные часы нормальная к берегу компонента скорости течения максимальна, а вдольбереговая достигает максимума с запаздыванием на 4–6 ч.

Ключевые слова: мезомасштабное совместное моделирование, ветровой апвеллинг, вертикальная структура полей скорости и температуры в море, сезонный термоклин, Черное море, Южный берег Крыма

Благодарности: работа выполнена в рамках проекта № 0555-2021-0002 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата».

Для цитирования: Ефимов В. В., Яровая Д. А., Барабанов В. С. Численное моделирование апвеллинга у Южного берега Крыма 24–25 сентября 2013 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 6–19. EDN SSUZYG. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-6-19

© Ефимов В. В., Яровая Д. А., Барабанов В. С., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Numerical Modelling of Upwelling near the South Coast of Crimea on 24–25 September 2013

V. V. Efimov, D. A. Iarovaia *, V. S. Barabanov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: darik777@mhi-ras.ru

Abstract

Using 2-km resolution coupled air-sea mesoscale model NOW (NEMO-OASIS-WRF), we studied a case of upwelling in the Black Sea near the South coast of Crimea on 24–25 September 2013. The NOW model successfully reproduced a sharp decrease of sea surface temperature (SST) by 10 °C within two days. The high spatial resolution in the model allowed us to describe upwelling features resulting from the orography and shape of the coastline. In particular, we found small-scale areas of low SST near the coast where surface wind is directed along the coast to the right, for example over the sea near the coastal Crimean Mountains. At the same time the upwelling does not occur in the areas where the coastal wind has another direction, for example in the north-western part of Karkinit Bay, near the coast north to Sevastopol, and near the Azov coast. It is shown that there is a vertical circulation cell in the sea caused by the upwelling: a rise of the seasonal thermocline near the shore, outflow of warm water in the upper quasi-homogenous layer and descend of water at the 30–50 km distance from the shore. We found that the coastal current has diurnal variation due to breeze circulation: the velocity component perpendicular to the coast reaches its maximum during the daylight hours, whereas velocity component directed along the coast reaches its maximum with a delay of 4–6 hours.

Keywords: mesoscale coupled modelling, wind upwelling, vertical structure of velocity and temperature fields in sea, seasonal thermocline, Black Sea, South Coast of Crimea

Acknowledgements: The work was performed under project no. 0555-2021-0002 “Fundamental studies of processes of interaction in the ocean – atmosphere system which determine the regional spatial-temporal variability of the natural environment and climate”.

For citation: Efimov, V.V., Iarovaia, D.A. and Barabanov, V.S., 2023. Numerical Modelling of Upwelling near the South Coast of Crimea on 24–25 September 2013. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 6–19. EDN SSUZXG. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-6-19

Введение

Апвеллинги в приповерхностном прибрежном слое моря являются относительно частым явлением для Южного берега Крыма (ЮБК). Сам физический механизм прибрежного ветрового апвеллинга – экмановский перенос вод от берега в сторону моря, вызываемый западным вдольбереговым ветром, – достаточно очевиден. В теплый период года это приводит к подъему холодных глубинных вод и значительным понижениям температуры поверхности моря (ТПМ) [1]. В результате приповерхностные воды обогащаются биогенными элементами и образуется богатая питательная среда для фито- и зоопланктона. Понижения температуры моря в прибрежных областях влияют на погоду и климат прилегающей суши.

Однако это простое представление о ветровом экмановском апвеллинге в прибрежных областях не всегда подходит для описания конкретных при-

родных явлений. Целый ряд факторов приводит к искажению пространственно-временной структуры прибрежного апвеллинга, а во многих случаях – к появлению новых механизмов его возникновения. Простая картина развития ветрового апвеллинга усложняется при учете влияния неоднородностей рельефа дна в прибрежной и шельфовой областях моря, сезонной и синоптической изменчивости поля ветра, особенностей бароклинного слоя моря. Местные черты развития апвеллинга в прибрежных и открытых районах океана активно изучались вначале аналитически, а затем и с использованием численных моделей, например в [2–6]. Обзор моделей апвеллинга можно найти в работе ¹⁾ и [1].

При изучении апвеллингов Черного моря необходимо также учитывать сравнительно небольшие размеры и замкнутость моря, в результате чего области холодных вод будут иметь мелкомасштабную пространственную структуру, а сами апвеллинги могут часто возникать в различных частях побережья. Вдольбереговые вариации рельефа дна и большие изгибы береговой линии существенно нарушают двумерность прибрежного апвеллинга.

Изучению апвеллингов в северной части Черного моря посвящен ряд численных экспериментов [7, 8]. Отметим также непосредственные наблюдения и численные расчеты развития апвеллинга у восточного побережья Черного моря – в районе Геленджика [9–13]. Работы последнего времени часто сопровождаются иллюстрациями спутниковых наблюдений апвеллингов, которые особенно хорошо обнаруживаются в теплый период года как области холодных прибрежных вод. Среди них отметим недавнюю работу [14], в которой дан обзор большого числа спутниковых наблюдений апвеллингов.

Спутниковые измерения температуры поверхности моря в настоящее время имеют достаточно высокое пространственное разрешение – менее 1 км. В то же время численные эксперименты по моделированию реальных случаев апвеллинга до недавнего времени в основном сводились к моделированию циркуляции всего Черного моря с грубым пространственным разрешением, либо же циркуляция рассчитывалась в локальной прибрежной модели с большим разрешением, но с грубым заданием гидрометеорологических характеристик на открытых границах расчетной области.

В связи с этим представляет интерес провести совместное численное моделирование развития апвеллинга с повышенным пространственным разрешением, используя в модели реалистичную береговую линию, рельеф дна и граничные условия на поверхности моря. В последнее время широкое применение получила численная модель региональной атмосферной циркуляции *WRF* ²⁾ и модель морской циркуляции *NEMO* ³⁾. Первые результаты использования совместной модели атмосфера – море, основанной на *WRF* и *NEMO*, для изучения реакции Черного моря на квазитропический циклон 2005 г. описаны

¹⁾ Моделирование и прогноз верхних слоев океана / Под ред. Е. Б. Крауса. Ленинград : Гидрометиздат, 1979. 367 с.

²⁾ A description of the advanced research WRF version 3 / W. C. Skamarock [et al.]. Boulder, Colorado, USA : NCAR, 2008. 112 p. (NCAR Technical Note ; NCAR/TN-475+STR). doi:10.5065/D68S4MVH

³⁾ NEMO ocean engine / G. Madec [et al.]. IPSL, 2016. 386 p. (Note du pôle de modélisation IPSL, № 27). URL: <http://www.nemo-ocean.eu/doc/> (date of access: 10.03.2023).

в [15]. В [16] эта совместная модель была использована для исследования характерной реакции верхнего слоя Черного моря на интенсивное ветровое воздействие.

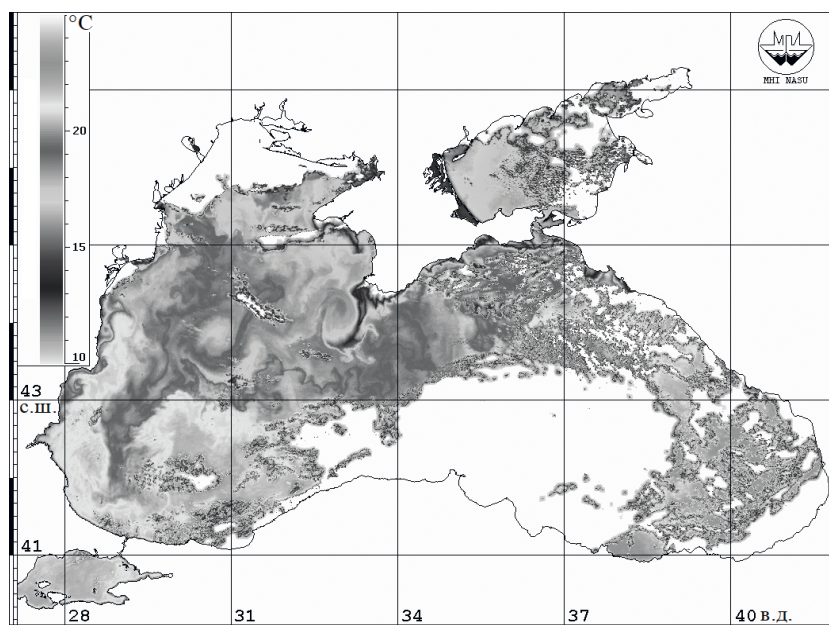
Эта работа посвящена описанию результатов моделирования, проведенного с разрешением 2 км с целью воспроизвести взаимодействие атмосферы и моря во время апвеллинга, возникшего 24–25 сентября 2013 г. в Черном море, в районе ЮБК. Мы не ставили задачу детально рассмотреть все физические механизмы, отвечающие за возникновение апвеллинга в Черном море. В работе численно воспроизведено развитие апвеллинга для одной конкретной синоптической ситуации и выделены мелкомасштабные особенности его структуры.

Численная модель

Совместная модель *NOW (NEMO-OASIS-WRF)* состоит из трех блоков: морской модели *NEMO*, атмосферной модели *WRF* и блока сопряжения *OASIS* [17]. Расчетная область включала в себя все Черное море. Горизонтальные расчетные сетки в морской и атмосферной модели были идентичны, чтобы избежать интерполяции при обмене данными. Пространственное разрешение расчетных сеток составляло 2 км. В атмосферной модели использовалось 37 вертикальных уровней, в морской – 50. Каждые два часа от *NEMO* к *WRF* передаются температура поверхности моря и скорости течения на поверхности, от *WRF* к *NEMO* – радиационные потоки тепла (коротковолновый и длинноволновый), потоки явного и скрытого тепла, напряжение трения ветра, а также разность между испарившейся влагой и выпавшими осадками. Для параметризации атмосферного приповерхностного слоя в *WRF* использовалась схема *Revised MM5 surface layer scheme*, в которой потоки явного и скрытого тепла от поверхности рассчитываются по стандартным балк-формулам. Для параметризации вертикального турбулентного перемешивания в *NEMO* использовалась схема $k-\epsilon$ [18]. Коэффициенты обмена в этой схеме определяются через турбулентную кинетическую энергию и скорость диссипации, которая является прогностической величиной. Результаты модели *NOW* выводились с шагом 1 ч.

Анализ спутниковых снимков ТПМ показал развитие апвеллинга вблизи Крыма 24–25 сентября 2013 г. (рис. 1). Совместное моделирование было начато в 00:00 21 сентября и продолжалось 5 сут. Начальные и боковые граничные условия для атмосферной модели были взяты из реанализа *ERA5* с разрешением 0.25° . Начальные условия для морской модели (поля скорости, температуры, солёности и уровня моря), а также рельеф дна были взяты из глобального реанализа *Copernicus*⁴⁾ с разрешением $1/12^\circ$. Вообще говоря, для более точного воспроизведения аномалий ТПМ необходима предварительная адаптация морской и атмосферной моделей в течение достаточно длительного промежутка времени. Но, поскольку для получения реанализа *Copernicus* в качестве атмосферного форсинга используются данные реанализа *ERA5*, начальные условия для морской модели уже в значительной степени

⁴⁾ URL: https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/INFORMATION (дата обращения: 03.02.2023).



Р и с . 1 . Спутниковый снимок температуры поверхности моря за 25 сентября 2013 г. (URL: <http://dvs.net.ru/mp/data/1309/3SEP2504.GIF>)

F i g . 1 . A satellite image of the sea surface temperature for 25 September 2013 (Available at: <http://dvs.net.ru/mp/data/1309/3SEP2504.GIF>)

адаптированы к атмосферным полям из модели *WRF*, что позволяет сократить время адаптационного расчета. По существу, нашей задачей было восстановление более детальной пространственной структуры ветрового апвеллинга в прибрежной области Крыма, не воспроизведенной в исходных полях реанализа с более грубым разрешением. Из-за вычислительных ограничений мы не использовали ансамблевый метод прогноза и остановились лишь на одном варианте траектории развития процесса, учитывая, что определяющими являются граничные условия: рельеф, тип подстилающей поверхности, очертания берега и т. д.

Развитие апвеллинга

На рис. 2 показаны изменения рассчитанных в модели ТПМ, зональной (вдольбереговой) скорости ветра на высоте 10 м и температуры воздуха на высоте 2 м в прибрежной точке 1 с координатами 34.15° в. д., 44.4° с. ш. Эта точка будет в дальнейшем рассматриваться как характерная для прибрежной относительно узкой области моря в районе ЮБК, где изобата 100 м начинается на расстоянии около 10 км, 200 м – на расстоянии 20 км, а 1000 м – на расстоянии 30 км от берега. Как видно из рис. 2, небольшое понижение ТПМ в первые двое суток сменилось резким понижением на $\sim 10^\circ\text{C}$, связанным с повышением приповерхностной скорости ветра и понижением температуры приводного воздуха. Таким образом, на рис. 2 хорошо представлен эпизод резкого локального развития ветрового прибрежного апвеллинга у ЮБК 24–25 сентября, показанный на спутниковом снимке (см. рис.1).

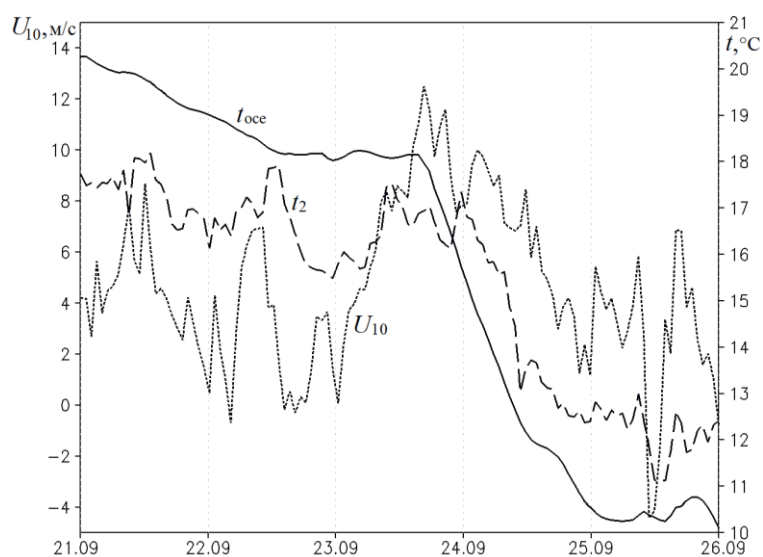


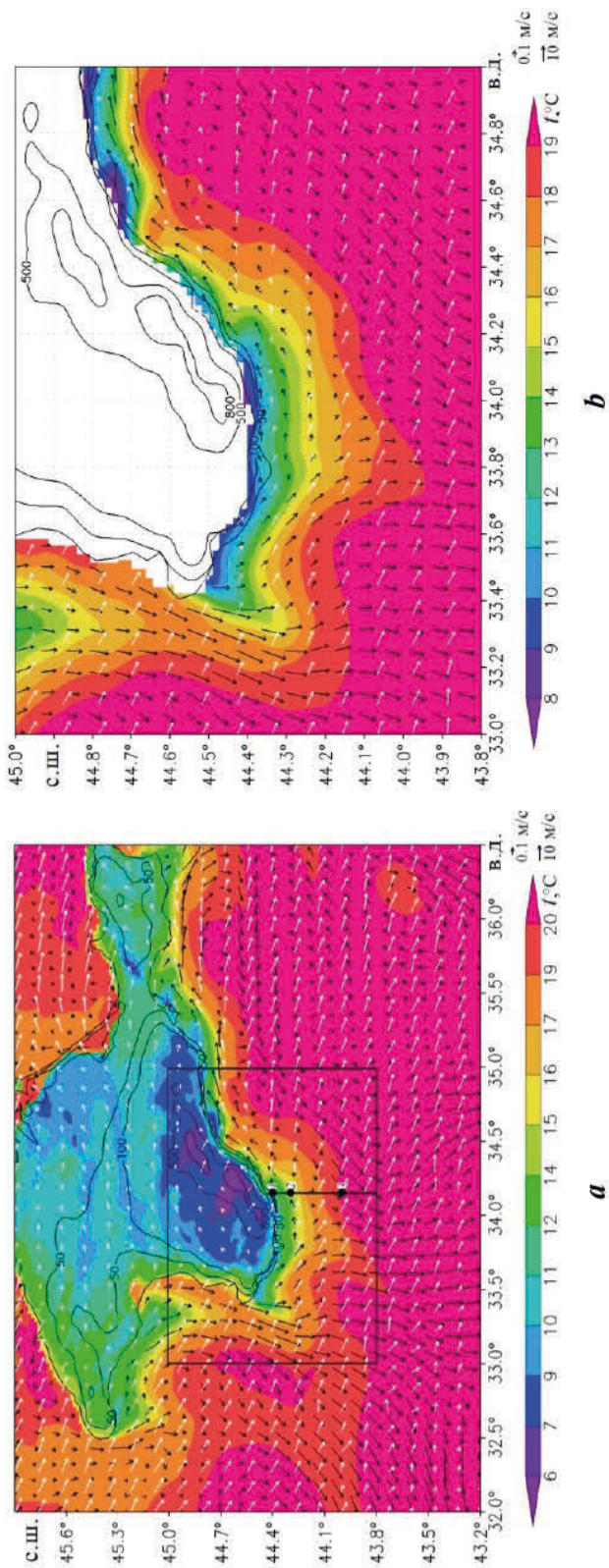
Рис. 2. Зональная (вдольбереговая) скорость ветра на высоте 10 м, U_{10} , приповерхностная температура воздуха на высоте 2 м, t_2 , и температура поверхности моря, t_{oce} , в прибрежной области в точке I

Fig. 2. Zonal (alongshore) wind speed at a height of 10 m, U_{10} , surface air temperature at a height of 2 m, t_2 , and sea surface temperature t_{oce} , in the coastal area at point I

Горизонтальная структура апвеллинга

Распределение ТПМ на спутниковом снимке (см. рис. 1) относится к максимально развитому апвеллингу. Примерно для этого же времени на рис. 3, *a* показаны полученные в результате моделирования поля скорости ветра на высоте 10 м и скорости течения на поверхности, а также поля температуры воздуха на высоте 2 м и ТПМ. Эти же поля показаны в увеличенном масштабе с большей детализацией на рис. 3, *b*. Отметим, что данные на рис. 3 относятся к ночному времени суток, для которого характерны низкие значения температуры над сушей.

Как видно из рис. 3, ветровой апвеллинг с минимальными температурами $\sim 11\text{--}12^\circ\text{C}$ занимает сравнительно узкую прибрежную зону; ширина области апвеллинга вблизи ЮБК $\sim 30\text{--}50$ км. При этом прибрежный апвеллинг имеет мелкомасштабную пространственную структуру, отражающую изгибы береговой линии и пространственные вариации направления ветра по отношению к берегу. Повышенное разрешение атмосферной модели позволило выделить мелкомасштабные неоднородности поля скорости ветра, определяемые очертаниями берега и рельефа, и, как следствие, локальную структуру апвеллинга. В частности, выделяются мелкомасштабные области понижения температуры там, где ветер направлен вправо вдоль берега, например четко выделяется вдольбереговое направление ветра над морем вблизи гор ЮБК. В то же время там, где прибрежный ветер имеет другое направление, апвеллинг отсутствует, например в северо-западной части Каркинитского залива, на побережье севернее Севастополя, а также на азовском побережье.



Р и с . 3 . Температура поверхности моря и температура воздуха над сушей на высоте 2 м, векторы приводной скорости ветра на высоте 10 м (белый цвет) и скорости течения на поверхности моря (черный цвет) для развитого апвеллинга в 23:00 24 сентября (черный отрезок – разрез; цифрами обозначены временные точки, для которых построены временные ряды на рис. 2 и вертикальные профили на рис. 4) (а); увеличенное изображение выделенной области (температура воздуха над сушей не показана) (б). Изолиниями показана высота рельефа (м)

Fig. 3. Sea surface temperature and air temperature overlaid at a height of 2 m, vectors of near-water wind speed at a height of 10 m (white colour), and sea surface current velocities (black colour) for a mature upwelling event at 11:00 p.m. on 24 September (black line – the cross-section; numbers denote the points for which time series are built in Fig. 2 and vertical profiles in Fig. 4) (a); enlarged view of the selected area (overland air temperature is not shown) (b). The isolines show the terrain height (m)

Для области ЮБК характерно чередование локальных зон сильного и слабого апвеллинга (рис. 3). Не вдаваясь в детали, отметим, что такие зоны усиления апвеллинга (филаменты) связаны с резкими локальными изменениями очертаний берега в виде мысов [2].

На рис. 3 можно также увидеть, что в открытом море приповерхностная скорость течения в целом направлена по нормали к приводному ветру, а вблизи, например, западного побережья Крыма это простое поведение нарушается из-за особенностей очертаний берега.

Вертикальная структура апвеллинга

Численное моделирование дает возможность детально рассмотреть вертикальную структуру полей скорости и температуры в апвеллинге. На рис. 4, на разрезе, проведенном вдоль 34.15° в. д., показаны температура моря и векторы скорости течения ($V_{\text{осе}}$; $W_{\text{осе}} \cdot 10^3$), где $V_{\text{осе}}$, $W_{\text{осе}}$ – меридиональная и вертикальная компоненты соответственно. Хорошо видна область холодного апвеллинга с пониженной температурой моря и уменьшенной глубиной залегания верхнего квазиоднородного слоя, распространяющаяся от берега на ~ 30 км. Минимальная температура вблизи берега составляет около 11°C . Отметим, что узкая прибрежная область малых (< 60 м) глубин здесь имеет ширину меньше шага расчетной сетки (2 км) и поэтому на рисунке не представлена.

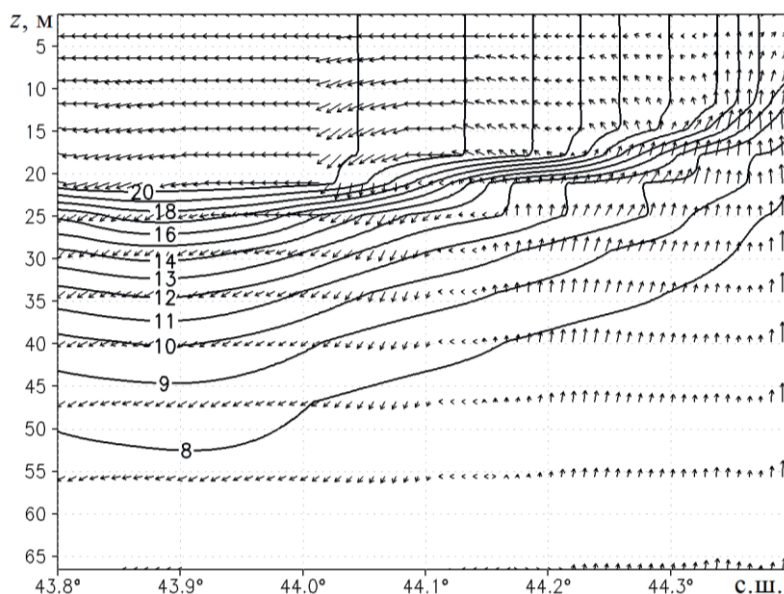


Рис. 4. Температура моря и векторы скорости течения ($V_{\text{осе}}$, $W_{\text{осе}} \cdot 10^3$), где $V_{\text{осе}}$ и $W_{\text{осе}}$ – меридиональная и вертикальная компоненты скорости, на разрезе, проведенном вдоль 34.15° в. д., для развитого апвеллинга в 18:00 24 сентября

Fig. 4. Sea temperature and current velocity vectors ($V_{\text{осе}}$, $W_{\text{осе}} \cdot 10^3$), where $V_{\text{осе}}$ and $W_{\text{осе}} \cdot 10^3$ are meridional and vertical velocity components, at the cross-section at 34.15° E for a mature upwelling event at 6 p.m. on 24 September

Таким образом, численное моделирование позволило выделить еще одну особенность ветрового апвеллинга – развитие вертикальной ячейки циркуляции: подъем воды в прибрежной зоне, отток в верхнем квазиоднородном слое и далее опускание на расстоянии 30–50 км от берега. Эта область опускания воды хорошо видна по векторам скорости на рис. 4.

На рис. 5 приведены вертикальные профили меридиональной скорости, $V_{\text{осе}}$, и температуры моря, $t_{\text{осе}}$, в двух точках разреза, показанного на рис. 3, а – в точке 2 (34.15° в. д., 44.3° с. ш.) и 3 (34.15° в. д., 44° с. ш.). Виден скачок скорости в области термоклина, свидетельствующий о различных механизмах формирования полей скорости выше и ниже сезонного термоклина: в области верхнего квазиоднородного слоя течение представляет собой отток холодной воды, формирующий апвеллинг за счет подъема ее у берега из области термоклина, в области ниже термоклина профиль скорости отражает фоновую геострофическую циркуляцию, не связанную непосредственно с апвеллингом. Интересно отметить, что температура в верхнем квазиоднородном слое постоянна, а профиль скорости наклонный. Последнее является следствием параметризации вертикального перемешивания в модели *NEMO*: поверхностная сила трения ветра вызывает в нижележащем квазиоднородном по температуре слое линейное затухание скорости. При этом выполняются условия формирования верхнего квазиоднородного профиля температуры.

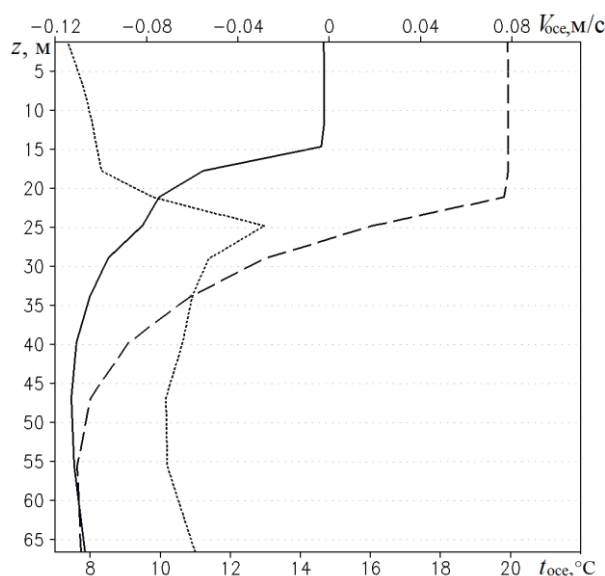


Рис. 5. Вертикальные профили температуры воды, $t_{\text{осе}}$, в точках 2 (сплошная линия) и 3 (штриховая линия), а также профиль меридиональной скорости, $V_{\text{осе}}$, в точке 3 (пунктирная линия) в 03:00 25 сентября

Fig. 5. Vertical profiles of water temperature, $t_{\text{осе}}$, at points 2 (solid line) and 3 (dashed line) as well as meridional velocity profile, $V_{\text{осе}}$, at point 3 (dotted line) at 3 a.m. on 25 September

На рис. 6 показаны компоненты скорости и температура в верхнем слое моря вдоль разреза по 34.15° в. д., продленного до 42.6° с. ш. Правая (северная) часть рис. 6 относится к апвеллингу, а в левой (южной) части для сравнения показаны фоновые поля, не связанные с апвеллингом. Значение зональной (вдольбереговой) компоненты скорости приповерхностного течения изменяется от небольших положительных значений ~ 0.1 м/с вблизи берега до отрицательных ~ -0.15 м/с в открытом море. Интересно рассмотреть поведение меридиональной компоненты скорости, нормальной по отношению к береговой линии. Как и следовало ожидать из общих соображений, скорость этого нормального к берегу течения, направленного в сторону открытого моря, максимальна на некотором расстоянии от берега (рис. 6). Она достигает значения ~ 0.2 м/с. Как видно из рис. 6, область пониженных ($< 20^\circ\text{C}$) значений температуры приповерхностного слоя моря относительно невелика и распространяется от берега на расстояние 50–60 км. При этом область, где проявляются возмущения полей скорости, прослеживается и на большем удалении от берега.

Это можно увидеть на рис. 7, на котором показано, как изменялись во времени меридиональная (направленная по нормали к берегу) и зональная (вдольбереговая) скорости течения на верхнем уровне модели вдоль того же разреза, что и на рис. 6. Хорошо видна область направленных от берега течений со скоростями, достигающими ~ 0.2 – 0.25 м/с на расстоянии 40–60 км,

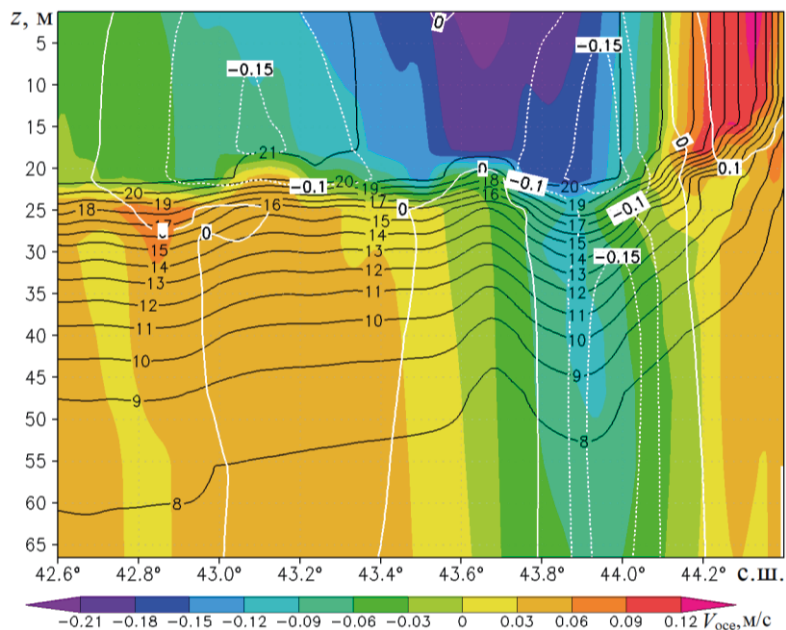
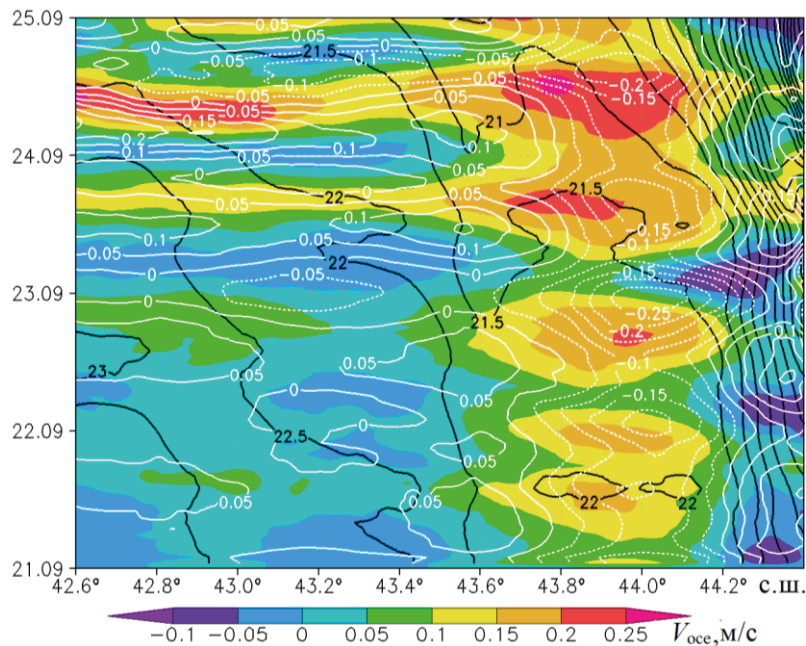


Рис. 6. Меридиональная скорость, температура воды (черные изолинии) и зональная скорость (белые изолинии) вдоль разреза по 34.15° в. д. в 3:00 25 сентября

Fig. 6. Meridional velocity, water temperature (black isolines), and zonal velocity (white isolines) along the cross-section at 34.15° E at 3 a.m. on 25 September



Р и с . 7. Изменение во времени меридиональной (цвет) и зональной (белые изолинии) скорости течения, а также температуры моря (черные изолинии) на верхнем уровне модели (1.25 м) вдоль разреза по 34.15° в. д. Для наглядности меридиональная скорость показана с противоположным знаком

Fig. 7. Time variation of the meridional (colour) and zonal (white isolines) current velocities as well as that of sea temperature (black isolines) at the upper level of the model (1.25 m) along the cross-section at 34.15° E. For illustrative purposes, the meridional velocity is shown opposite in sign

а также область направленных к берегу течений с меньшими скоростями ~ 0.1 м/с на расстоянии 20–30 км. Видна суточная периодичность приповерхностных течений. Максимальная скорость, направленная от берега, приходится на дневные часы (12–14 ч), что соответствует времени максимального суточного прогрева воздуха и суточному ходу прибрежной скорости ветра. Вдольбереговая компонента скорости также испытывает периодические суточные колебания с запаздыванием по времени на 4–6 ч по отношению к нормальной компоненте. Можно с уверенностью полагать, что эти прибрежные периодические изменения скорости и температуры воды возбуждаются бризовой циркуляцией, развивающейся в теплый период года в области ЮБК [19]. Мы не будем рассматривать физические механизмы взаимодействия этих двух мезомасштабных процессов – это требует повышения пространственного разрешения численных моделей.

Заключение

При помощи совместной численной модели с разрешением 2 км, включающей атмосферную модель *WRF* и морскую *NEMO*, воспроизведена реакция верхнего слоя Черного моря на усиление скорости ветра в прибрежной области ЮБК. Численная оценка понижения ТПМ вблизи берега на ~ 10 °С, вызванного холодным апвеллингом, согласуется с данными спутниковых измерений.

Получена пространственная структура полей приповерхностной скорости ветра и температуры воздуха, а также скорости течения и температуры моря. Повышенное пространственное разрешение в атмосферной и морской модели позволило выделить мелкомасштабные неоднородности, связанные с неоднородностями берега и прибрежного рельефа, не разрешаемые во входных данных реанализа. Область прибрежного апвеллинга имеет существенно неоднородную вдольбереговую пространственную структуру: в восточной, северо-восточной и северо-западной частях крымского побережья апвеллинг отсутствует.

Рассмотрены особенности изменения меридиональной (нормальной к берегу) и зональной (вдольбереговой) компонент скорости течения в апвеллинге. Показано развитие вдольберегового течения, а также течения, направленного в сторону моря. Последнее является частью вертикальной ячейки апвеллинговой циркуляции: подъем холодных вод вблизи берега, распространение в сторону моря и далее опускание. Горизонтальные скорости течения в этой ячейке вблизи поверхности составляют 0.1–0.2 м/с, вертикальные скорости подъема вод в прибрежной области составляют около 10^{-4} – 10^{-3} м/с. Непосредственно вблизи берега обнаруживаются колебания скорости с суточным периодом, связанные с влиянием бризовой циркуляции.

Анализ результатов совместного моделирования показал, что модель *NOW* способна правильно воспроизводить такие мелкомасштабные явления, как ветровой апвеллинг вблизи крымского побережья, и может быть использована для численного исследования процессов в верхнем слое моря с высоким пространственным разрешением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В. А., Михайлова Э. Н. Апвеллинг в Черном море. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 92 с.
2. Brink K. N. The near-surface dynamics of coastal upwelling // *Progress in Oceanography*. 1983. Vol. 12, iss. 3. P. 223–257. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(83\)90009-5](https://doi.org/10.1016/0079-6611(83)90009-5)
3. Allen J. S. Upwelling and coastal jets in a continuously stratified ocean // *Journal of Physical Oceanography*. 1973. Vol. 3, iss. 3. P. 245–257. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1973\)003<0245:UACJIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1973)003<0245:UACJIA>2.0.CO;2)
4. Preller R., O'Brien J. J. The influence of bottom topography on upwelling off Peru // *Journal of Physical Oceanography*. 1980. Vol. 10, iss. 9. P. 1377–1398. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1980\)010<1377:TIOBTO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010<1377:TIOBTO>2.0.CO;2)
5. Philander S. J. H., Yoon J.-H. Eastern boundary currents and coastal upwelling // *Journal of Physical Oceanography*. 1982. Vol. 12, iss. 8. P. 862–879. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1982\)012<0862:EVCACU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1982)012<0862:EVCACU>2.0.CO;2)

6. *Peffley M. B., O'Brien J. J.* A Three-dimensional simulation of coastal upwelling off Oregon // *Journal of Physical Oceanography*. 1976. Vol. 6, iss. 2. P. 164–180. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1976\)006<0164:ATDSOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1976)006<0164:ATDSOC>2.0.CO;2)
7. *Андросович А. И., Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б.* Численная модель и расчеты циркуляции вод северо-западной части Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 1994. № 5. С. 28–42.
8. *Коснырев В. К., Михайлова Э. Н., Станичный С. В.* Апвеллинг в Черном море по результатам численных экспериментов и спутниковым данным // *Морской гидрофизический журнал*. 1996. № 5. С. 34–46.
9. Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга и даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море / А. Г. Зацепин [и др.] // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 2. С. 203–214. EDN VRYSTZ. doi:10.7868/S0030157416020222
10. *Гинзбург А. И.* О нестационарных струйных течениях в юго-западной части Черного моря // *Исследования Земли из космоса*. 1995. № 4. С. 10–16.
11. Циклонические вихри апвеллингового происхождения у юго-западной оконечности Крыма / А. И. Гинзбург [и др.] // *Исследования Земли из космоса*. 1998. № 3. С. 83–88.
12. *Дивинский Б. В., Куклев С. Б., Зацепин А. Г.* Численное моделирование события полного апвеллинга в северо-восточной части Черного моря на гидрофизическом полигоне ИО РАН // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 5. С. 683–689. <https://doi.org/10.7868/S0030157417050021>
13. *Полонский А. Б., Музылева М. А.* Современная пространственно-временная изменчивость апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2016. № 4. С. 96–108. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-4-96-108>
14. *Станичная Р. Р., Станичный С. В.* Апвеллинги Черного моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 4. С. 195–207. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-4-195-207
15. Реакция верхнего слоя Черного моря на прохождение циклона 25–29 сентября 2005 г. / Д. А. Яровая [и др.] // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 10. С. 38–52. EDN CTZUFK.
16. *Яровая Д. А., Ефимов В. В.* Развитие холодной аномалии температуры поверхности Черного моря // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 57, № 4. С. 471–483. EDN YAJJOC. doi:10.31857/S0002351521040118
17. *Valcke S.* The OASIS3 coupler: A European climate modelling community software // *Geoscientific Model Development*. 2013. Vol. 6, iss. 2. P. 373–388. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-373-2013>
18. *Rodi W.* Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1987. Vol. 92, iss. C5. P. 5305–5328. <https://doi.org/10.1029/JC092iC05p05305>
19. *Ефимов В. В.* Численное моделирование бризовой циркуляции над Крымским полуостровом // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53, № 1. С. 95–106. EDN YIUXVD. doi:10.7868/S0002351517010047

Поступила 14.11.2022 г.; одобрена после рецензирования 23.01.2023 г.; принята к публикации 01.02.2023 г.; опубликована 24.03.2023 г.

Сведения об авторах:

Яровая Дарья Александровна, старший научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физико-математических наук, **ResearcherID: Q-4144-2016, ORCID ID: 0000-0003-0949-2040, Scopus Author ID: 57205741734, darik777@mhi-ras.ru**

Ефимов Владимир Васильевич, заведующий отделом взаимодействия атмосферы и океана, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор физико-математических наук, профессор, **ResearcherID: P-2063-2017, Scopus Author ID: 6602381894, vefim38@mail.ru**

Барабанов Владислав Сергеевич, старший научный сотрудник, отдела взаимодействия атмосферы и океана, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физико-математических наук, **ResearcherID: C-6007-2013, Scopus Author ID: 7006247713, wbarbs@gmail.com**

Вклад авторов:

Яровая Дарья Александровна – численное моделирование, обработка и интерпретация результатов моделирования, подготовка рисунков

Ефимов Владимир Васильевич – формулирование задачи, участие в обсуждении результатов, критический анализ статьи

Барабанов Владислав Сергеевич – участие в обсуждении результатов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Влияние апвеллинга на развитие речного плюма в прибрежной зоне северо-западного шельфа Черного моря на основе численного моделирования

М. В. Цыганова *, Е. М. Лемешко, Ю. Н. Рябцев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
**e-mail: m.tsyganova@mhi-ras.ru*

Аннотация

Проявление прибрежного апвеллинга наблюдается у западного побережья Черного моря при южном ветре. В этом же районе сильное влияние на гидрологическую структуру вод оказывает сток рек, который формирует речной плюм и вдольбереговое течение, направленное на юг. Целью данной работы является изучение эволюции плюма на северо-западном шельфе Черного моря и его взаимодействие с апвеллингом на основе численного моделирования. Влияние развития апвеллинга под действием ветра южных румбов на распространение плюма исследовалось с помощью трехмерной сигма-координатной численной модели POM-типа для расчета циркуляции в прибрежной зоне с учетом стока реки. Расчеты проведены для прямоугольной области для случаев как однородной по глубине, так и типичной для мая (когда в среднем наблюдается максимальное развитие плюма Дуная) стратификации вод северо-западного шельфа. Получено, что совместная динамика апвеллинга и речного плюма тесно связана со стратификацией прибрежных вод. В случае нестратифицированных вод шельфа тонкий слой плюма усиливает апвеллинг и даунвеллинг на береговой и морской сторонах речного плюма соответственно. Полученные результаты позволили изучить особенности трансформации речных вод в период действия ветров, вызывающих развитие прибрежного апвеллинга. Оценки времени подъема придонных вод у берега при действии южных ветров с различными скоростями ветра и параметрами стратификации вод шельфа по данным численного моделирования могут быть использованы для разработки региональных индексов апвеллинга на основе спутниковых данных о температуре поверхности моря и скорости ветра.

Ключевые слова: Черное море, речной плюм, апвеллинг, численное моделирование, шельф, прибрежная зона, речной сток

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме FNNN-2021-0005.

Для цитирования: Цыганова М. В., Лемешко Е. М., Рябцев Ю. Н. Влияние апвеллинга на развитие речного плюма в прибрежной зоне северо-западного шельфа Черного моря на основе численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 20–30. EDN SYKFPE. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-20-30

© Цыганова М. В., Лемешко Е. М., Рябцев Ю. Н., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Influence of Upwelling on River Plume Development in the Coastal Zone of the North-Western Black Sea Shelf Based on Numerical Modelling

M. V. Tsyganova *, E. M. Lemeshko, Yu. N. Ryabtsev

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: m.tsyganova@mhi-ras.ru*

Abstract

In a south wind, coastal upwelling can be observed off the western coast of the Black Sea. In the same area, the hydrological structure of waters is strongly influenced by river runoff, which forms a river plume, and a southward longshore byoancy current. The paper studies the evolution of the plume on the northwest shelf of the Black Sea and its interaction with upwelling based on numerical modelling. The impact of upwelling development under the influence of the south wind on plume propagation was studied using a three-dimensional sigma-coordinate numerical model (POM-type) to calculate the circulation in the coastal zone taking into account the river runoff. The model runs were performed for a rectangular region for the cases: uniform depth stratification and typical water stratification of the northwestern shelf. The last stratification case was chosen for May condition, when, on average, the Danube plume development is maximal. It is obtained that the joint dynamics of upwelling and river plume are closely related to the stratification of coastal waters. In the case of unstratified shelf waters, the thin plume layer enhances upwelling and downwelling on the inshore and offshore sides of the river plume, respectively. The results allowed studying the peculiarities of river water transformation during winds that cause the development of coastal upwelling. Estimates of the time of bottom water rise near the coast under the action of south winds with different wind velocities and shelf water stratification parameters retrieved from numerical modelling data can be used to develop regional upwelling indices based on satellite data on the sea surface temperature and wind velocity.

Key words: Black Sea, river plume, upwelling, numerical modelling, shelf, coastal zone, river runoff

Acknowledgements: The work was performed under state assignment on topic no. FNNN-2021-0005.

For citation: Tsyganova, M.V., Lemeshko, E.M., Ryabtsev, Yu.N., 2023. Influence of Upwelling on River Plume Development in the Coastal Zone of the North-Western Black Sea Shelf Based on Numerical Modelling. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 20–30. EDN SYKFPE. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-20-30

Введение

Северо-западная часть Черного моря характеризуется обширным шельфом и значительным речным стоком, а также разнообразием морфологических типов плюмов в районе дельты Дуная и Днепро-Бугского лимана [1]. Поэтому северо-западный шельф является уникальным полигоном для изучения динамики речных плюмов различных типов [2]. Многолетние архивные гидрологические наблюдения этого района позволяют проводить верификации численных моделей речных плюмов.

При южном ветре вдоль западного побережья Черного моря наблюдается проявление апвеллинга. На гидрологическую структуру вод этого района

сильное влияние оказывает сток рек, который является источником поступления пресных вод и формирования стокового гидрофронта. В случае вдольберегового апвеллинга в прибрежной зоне возникают различные гидролого-гидрохимические ситуации [3]. Они тесно связаны с динамикой плюма. Поэтому необходимо понимать, как меняется распространение речных вод при развитии прибрежного апвеллинга.

Возникновение и эволюция апвеллинга в Черном море ранее изучались на основе анализа контактных и спутниковых данных [4–9] и численного моделирования [10, 11]. Спутниковые данные позволяют регистрировать более холодные воды [7, 10, 11], но высокая изменчивость и транспорт речных вод в районе северо-западного шельфа существенно затрудняют изучение процессов такими способами [12, 13]. Поэтому важно наряду с контактными и дистанционными данными использовать численное моделирование [14].

Развитие апвеллинга у северо-западного берега Черного моря происходит под действием ветров южных направлений. Многолетняя статистика образования апвеллингов, полученная на основе анализа данных дистанционного зондирования о температуре поверхности моря, показала, что в период расширенного лета происходит от 3 до 10 интенсивных апвеллингов общей продолжительностью по времени от 35 до 65 % от длительности летнего периода соответственно [7]. Из сопоставления анализа контактных и спутниковых данных сделан вывод о значительном влиянии эволюции апвеллинга на распространение речного плюма [3, 15].

Возникновение прибрежного апвеллинга компенсируется геострофическим течением и связанным с ним пресноводным плюмом. Особый интерес вызывает изучение динамического взаимодействия прибрежного апвеллинга и речного плюма. Речные воды с низкой соленостью создают градиенты давления, вызывающие поверхностные геострофические течения, которые возникают в прибрежной зоне в антициклоническом направлении (в Северном полушарии) от устья [16]. Речной плюм может ослаблять развитие апвеллинга, если ветер слишком слабый для того, чтобы нарушить халинную стратификацию. Изменение стратификации вод шельфа является важным фактором, который обуславливает динамику плюма и апвеллинга, влияя на толщину плюма, перенос распресненных вод во внутреннюю область шельфа и придонный перенос более плотных придонных вод в сторону берега [17].

Поэтому данная работа посвящена изучению совместной динамики развития апвеллинга и речного плюма, выделению закономерностей влияния апвеллинга на трансформацию речных вод на шельфе моря в период развития прибрежного апвеллинга.

Материалы и методы

Из базы гидрологических данных МГИ (URL: <http://bod-mhi.ru/>) были отобраны поля температуры и солености для ветровых условий со значениями скорости ветра менее $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. По пространственному распределению изолиний температуры и солености оценивалась эволюция речного стока в районе дельты Дуная и изучалась динамика речного плюма, которые рассматривались как фоновые характеристики в отсутствие воздействия ветра. Характерное время, за которое плюм достигает южной границы северо-западного шельфа в отсутствие воздействия ветра, составляет около пяти дней, что соответствует оценкам, полученным на основании подхода [2].

Влияние развития апвеллинга под действием ветра южных румбов на распространение пюма исследовалось с помощью численного моделирования на основе ранее адаптированной и протестированной для северо-западного шельфа Черного моря трехмерной сигма-координатной численной модели *POM*-типа для расчета циркуляции в прибрежной зоне с учетом стока реки [18, 19]. Расчеты проведены для прямоугольной области для случаев как однородной по глубине, так и типичной для мая (когда в среднем наблюдается максимальное развитие пюма Дуная) стратификации вод северо-западного шельфа.

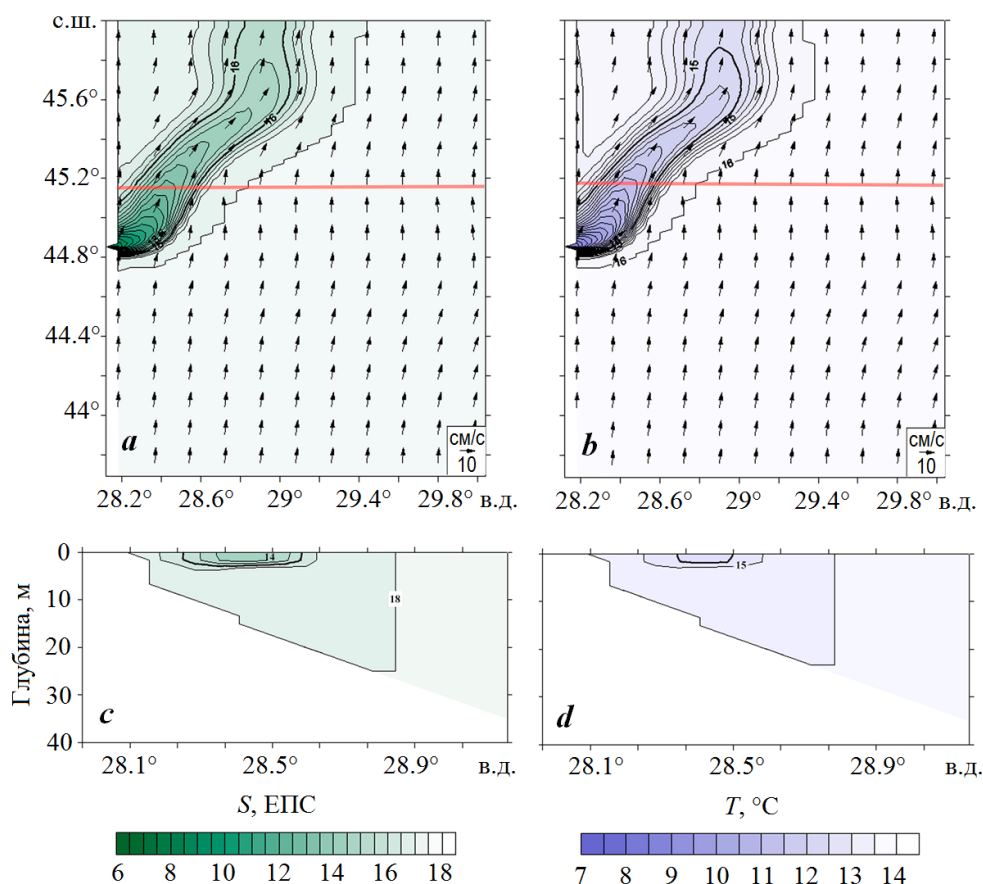
Параметры модели были подобраны таким образом, чтобы они соответствовали району впадения Дуная в Черное море. Модель была адаптирована для прямоугольной области и условий северо-западного шельфа Черного моря. Координаты расчетной области: 28° – 31° в. д. и 43° – 46° с. ш., число узлов сетки по оси X равно 51, число узлов сетки по оси Y – 171, шаг сетки – 2 км, шаг по времени – 2 мин, количество сигма-горизонтов – 25. В начальный момент времени расчета включается поступление пресной воды в районе устья Дуная.

Для первого варианта расчетов задавалась однородная стратификация: соленость вод шельфа – 18 ЕПС, температура 18°C , а соленость втекающей воды в районе устья Дуная – 6 ЕПС, температура воды в устье 10°C , расходы реки соответствовали климатическим значениям для апреля – мая ($8000\text{ м}^3\cdot\text{с}^{-1}$). На шельфе задавалось фоновое стационарное течение, направленное на юг, его скорость составляла $5\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ [19]. Для второго варианта расчета использовались климатические значения температуры и солености для мая в приустьевой области: на поверхности задавалась температура воды шельфа 15.75°C , соленость 12 ЕПС, температура у дна 6.5°C , соленость 18.25 ЕПС [20]. Термоклин находился на глубине 20 м, а галоклин – 12 м, глубина дна 40 м. Расход реки, температура и соленость такие же, как и в первом варианте расчета.

Результаты

При действии южного ветра со скоростью $5\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ и при расходе реки Q , равном $8000\text{ м}^3\cdot\text{с}^{-1}$, на 10-е сутки пюм вытягивается от берега в северо-восточном направлении (рис. 1).

При этом развитие прибрежного апвеллинга блокирует распространение вдольберегового течения распресненных вод из области пюма в южном направлении. Чтобы понять роль стратификации, проведено сопоставление результатов расчетов для вариантов без стратификации (рис. 1) и со стратификацией (рис. 2). Для случая без стратификации апвеллинг развивается через 3–5 дней, но он не проявляется в поле поверхностной температуры в силу однородности ее распределения по вертикали (рис. 1, *b*). Тем не менее развивается вдольбереговое течение со скоростями 5 – $10\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$, направленное на север, которое блокирует первоначальное распространение пюма на юг, и с течением времени пюм вытягивается во внутреннюю область шельфа, что трассируется как по солености (рис. 1, *a*), так и по температуре поверхности воды, поскольку температура речных вод меньше температуры вод шельфа на 8°C (рис. 1, *b*).



Р и с . 1 . Поверхностная соленость (a) и температура (b) воды по данным моделирования на 10-е сутки для однородной стратификации при воздействии южного ветра со скоростью $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Красной линией (a, b) обозначены зональные разрезы полей солености (c) и температуры (d) вдоль широты 45.18° с. ш.

F i g . 1 . Surface salinity (a) and temperature (b) of water from modelling data on the 10th day for uniform stratification influenced by the south wind with a velocity of $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The red line (a, b) denotes zonal sections of salinity (c) and temperature (d) fields along 45.18°N latitude

Ширина плюма, определяемая по положению изохалины 16 ЕПС вдоль линии разреза по широте 45.18° с. ш., составляет примерно 25 км, в поле температуры это соответствует границе плюма по изотерме 16°C (рис. 1, a, b). При этом толщина плюма около 5 м, что видно на зональных разрезах полей солености (рис. 1, c) и температуры (рис. 1, d).

Для случая со стратификацией на 10-е сутки апвеллинг приобретает хорошо развитую форму: изотерма 8°C , которая характеризует придонные воды, на 10-е сутки выходит на поверхность до 28.6° в. д. (~ 20 км от берега), кроме области в районе дельты реки (рис. 2, b).

Апвеллинг отодвигает плюм в сторону шельфа, положение изотермы 10°C сдвигается на восток, и она достигает на 10-е сутки долготы 28.9° в. д.

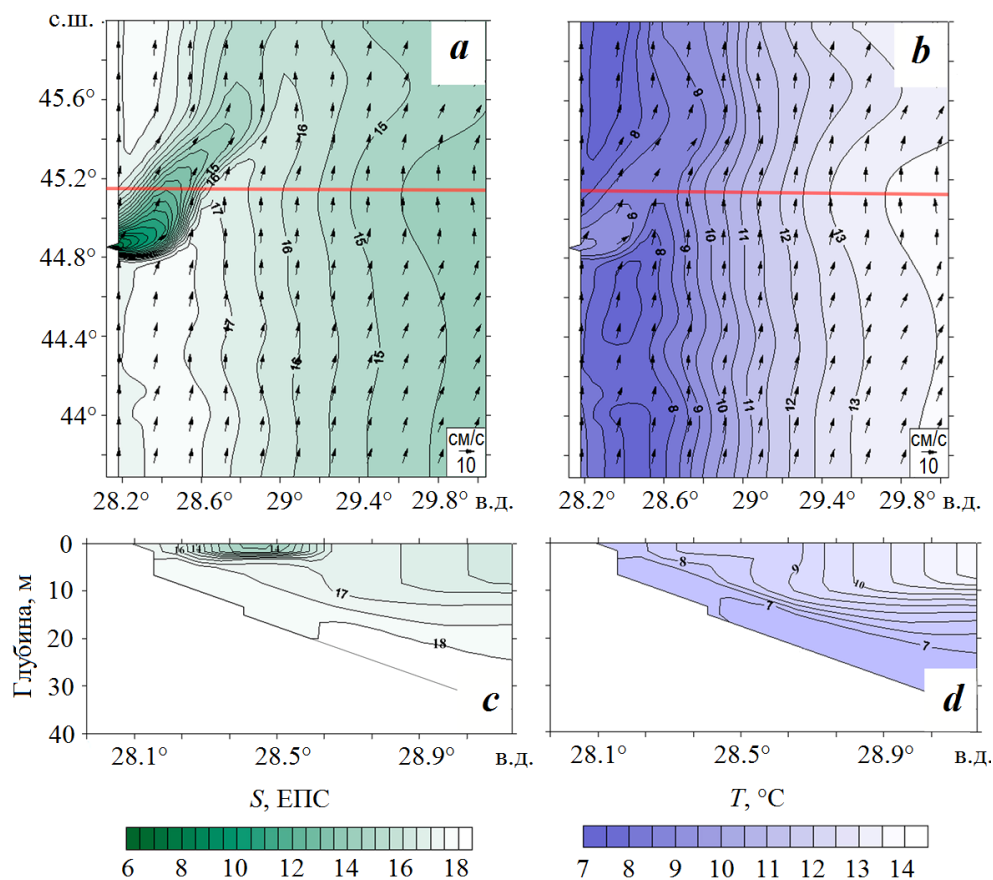


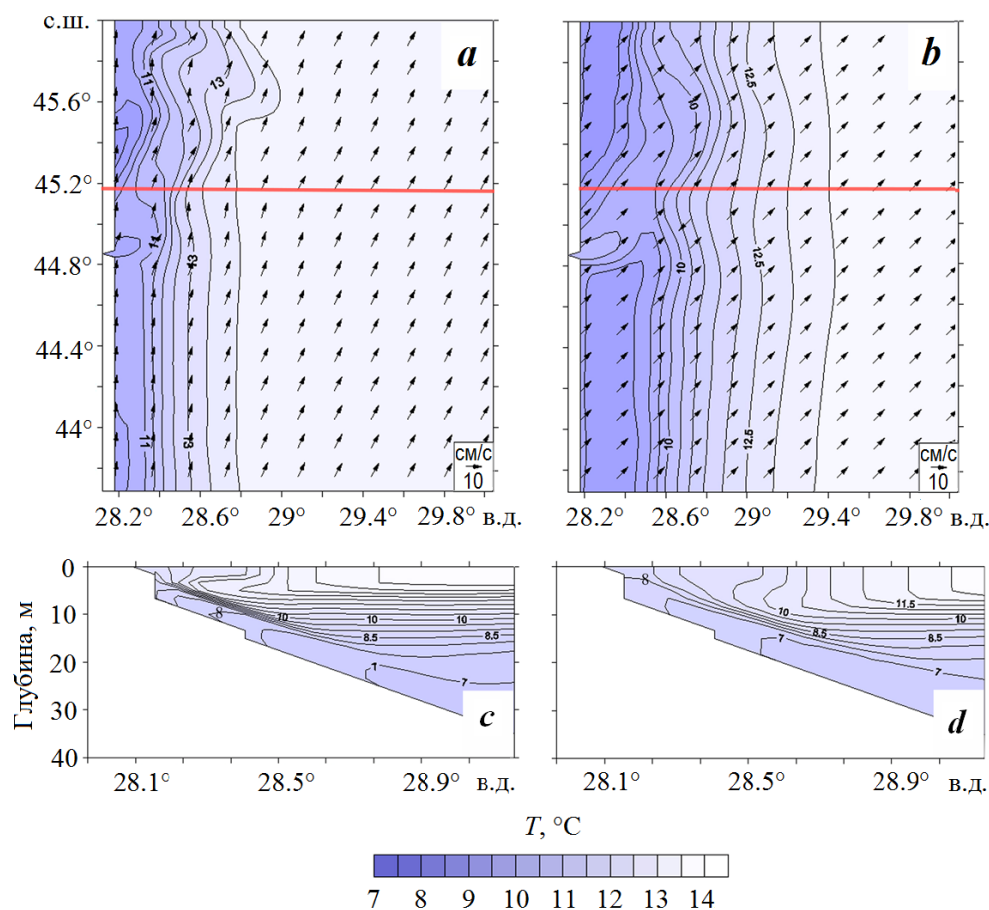
Рис. 2. Поверхностная солёность (a) и температура (b) воды по данным моделирования на 10-е сутки со стратификацией вод шельфа при воздействии южного ветра со скоростью $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Красной линией (a, b) обозначены зональные разрезы полей солёности (c) и температуры (d) вдоль широты 45.18° с. ш.

Fig. 2. Surface salinity (a) and temperature (b) of water from modelling data on the 10th day with shelf water stratification influenced by the south wind with a velocity of $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The red line (a, b) denotes zonal sections of salinity (c) and temperature (d) fields along 45.18°N latitude

(рис. 2, b) – ~ 55 км от берега, что в поле солёности соответствует положению изохалины 17 ЕПС, характеризующей придонные воды шельфа (рис. 2, a). Таким образом, из-за малых контрастов между температурой реки и вод шельфа идентификация плюма по спутниковым данным о температуре поверхности моря не дает вклада в статистику апвеллингов и плюмов. При анализе результатов численного моделирования в этом случае используется поле солёности. Кроме того, в отличие от первого случая без стратификации (рис. 1, d), плюм не выделяется в поле температуры и на зональном разрезе (рис. 2, d). На 10-е сутки плюм вытягивается в северо-восточном направлении, ширина плюма по изохалине 16 ЕПС увеличивается по сравнению с первым случаем и составляет 30 км.

На зональном разрезе вдоль широты 45.18° с. ш. видно, что на 10-е сутки поднятие придонных вод (изохалина 18 ЕПС) достигает глубины 17 м, изохалина 17 ЕПС выходит на поверхность на расстоянии от берега ~ 8 км (рис. 2, *c*). В отличие от вод плюма, положение придонных вод хорошо выделяется на зональных разрезах в поле температуры: изотерма 7°C достигает глубины 10 м, а изотерма 8°C выходит на поверхность на расстоянии 8–10 км от берега (рис. 2, *d*).

Эволюция прибрежного апвеллинга по времени продемонстрирована на рис. 3. При расчёте со стратификацией, типичной для условий мая, наблюдается развитие прибрежного апвеллинга уже на 2-е – 3-и сутки. На 3-и сутки придонные воды с температурой $7\text{--}8^\circ\text{C}$ образуют язык холодных вод, который



Р и с . 3 . Поверхностная температура воды по данным моделирования со стратификацией вод шельфа при воздействии южного ветра со скоростью $5\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ на 3-и (*a, c*) и 7-е (*b, d*) сутки. Красной линией (*a, b*) обозначены зональные разрезы полей температуры на 3-и (*c*) и 7-е (*d*) сутки вдоль широты 45.18° с. ш.

F i g . 3 . Surface salinity of water from modelling data with shelf water stratification influenced by the south wind with a velocity of $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ on the 3^d (*a, c*) and 7th (*b, d*) day. The red line (*a, b*) denotes zonal sections of temperature fields on the 3^d (*c*) and 7th (*d*) day along 45.18°N latitude

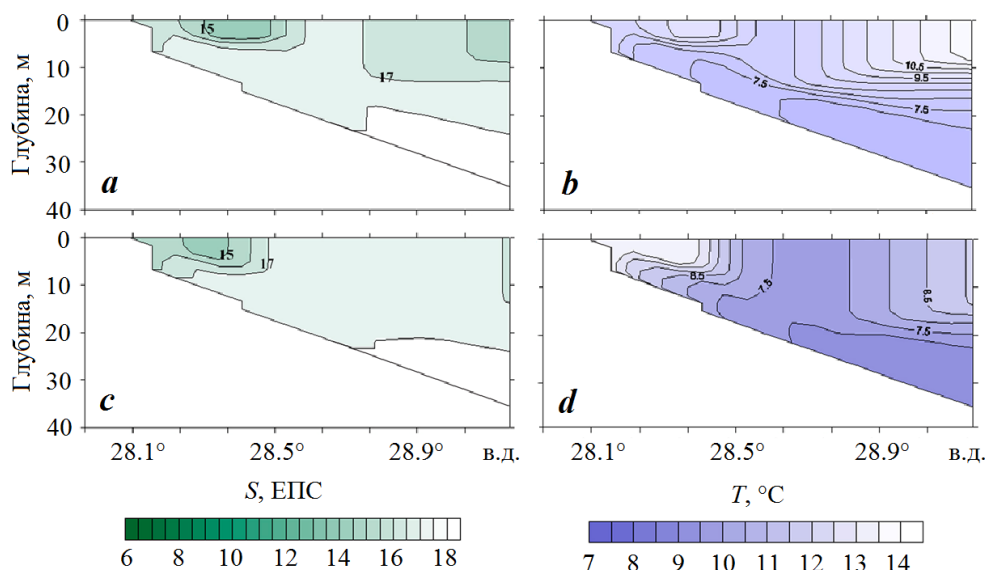
поднимается вдоль свала глубин и достигает отметки 10 м (рис. 3, *c*). На 7-е сутки изотерма 8 °С достигает глубины 3 м (рис. 3, *d*), на 8-е сутки выходит на поверхность. Изотерма 10 °С на 3-и сутки выходит на поверхность у берега (рис. 3, *c*) и маскирует в поле температуры положение плюма с температурой 10 °С. Воды с температурой 10–11 °С занимают всю вдольбереговую прибрежную область и хорошо проявляются в поле поверхностной температуры (рис. 3, *a*). С течением времени изотерма 10 °С сдвигается на восток и на 7-е сутки достигает 28.6° в. д. ~ 35 км от берега (рис. 3, *b*).

Развитие апвеллинга по времени также анализировалось на основании изменчивости положения изохалин на зональном разрезе через область плюма вдоль 45.18° с. ш. Время подъема придонных вод, характеризующихся соленостью 17 ЕПС, вдоль всего побережья в среднем составило 5 сут при скорости ветра 5 м·с⁻¹. При этом подъем придонных вод происходит вдоль берегового склона и в дальнейшем после 5-х суток развивается их перенос в поверхностном экмановском слое в область шельфа. По данным численного моделирования возможно получить детальные оценки скорости подъема вод при развитии прибрежного апвеллинга для различных значений скорости ветра, угла наклона дна и параметров стратификации вод шельфа. Время адвекции t_{ad} придонных вод вдоль склона шельфа прямо пропорционально произведению разности глубин залегания пикноклина H_0 и глубины подъема изопикны (изотермы) H_1 , характеризующей придонные воды, в процессе развития апвеллинга:

$$t_{ad} = \frac{\rho \cdot f \cdot d \cdot (H_0 - H_1)}{\alpha \cdot \tau}, \quad (1)$$

где ρ – плотность морской воды; f – параметр Кориолиса; d – толщина придонного слоя; α – угол наклона дна; τ – напряжение ветра. Уравнение (1) дает теоретическую оценку времени адвекции в зависимости от угла наклона дна и напряжения ветра. Для параметров, характерных для северо-западного шельфа, и напряжения ветра, соответствующего скорости ветра 5 м·с⁻¹, получаем значение 3 дня. Если время действия южного ветра меньше времени адвекции по формуле (1), в данном случае менее 3 дней, то холодные воды не успевают достигнуть поверхности. Таким образом, апвеллинг не проявится в поле поверхностной температуры моря, что необходимо учитывать при анализе спутниковых данных.

Время адвекции t_{ad} обратно пропорционально напряжению ветра. Для одного и того же значения угла наклона дна α были проведены численные расчеты для случая со стратификацией вод шельфа и с разными скоростями южного ветра (7 и 9 м·с⁻¹). При скорости ветра 7 м·с⁻¹ на 5-е сутки изохалина 17 ЕПС достигает поверхности (рис. 4, *a*), а язык холодных вод поднимается вдоль склона до глубины 5 м – по положению изотермы 8 °С (рис. 4, *b*). Для скорости ветра 9 м·с⁻¹ на 5-е сутки соленые воды (17 ЕПС) занимают более обширную область на поверхности (рис. 4, *c*), а холодные воды (менее 8 °С) находятся на поверхности, ширина зоны апвеллинга по этой изотерме составляет 30 км (рис. 4, *d*).



Р и с . 4 . Зональные разрезы вдоль широты 45.18° с. ш. полей солёности (*a, c*) и температуры воды (*b, d*) по данным моделирования со стратификацией вод шельфа на 5-е сутки при воздействии южного ветра со скоростью 7 (*a, b*) и 9 м·с⁻¹ (*c, d*)

F i g . 4 . Zonal sections along 45.18°N latitude: salinity (*a, c*) and temperature (*b, d*) of water from modelling data with shelf water stratification on the 5th day influenced by the south wind with a velocity of 7 m·s⁻¹ (*a, b*) and 9 m·s⁻¹ (*c, d*)

Выводы

Полученные результаты позволили изучить особенности трансформации речных вод в период действия ветров, вызывающих развитие прибрежного апвеллинга. Проанализировано распространение плюма, обусловленное экмановским переносом в зависимости от стратификации вод шельфа и скорости ветра. Получено, что совместная динамика апвеллинга и речного плюма тесно связана со стратификацией прибрежных вод. В случае нестратифицированных вод шельфа тонкий слой плюма усиливает апвеллинг и даунвеллинг на береговой и морской сторонах речного плюма соответственно. Интенсивность апвеллинга увеличивается, когда плюм достигает его границы. При этом максимум транспорта вод в сторону шельфа в 1.5 раза превосходит экмановский перенос. После прохождения плюмом области апвеллинга транспорт вод регулируется вдольбереговыми вариациями плотности.

Полученные закономерности динамики плюма в условиях развития апвеллинга проявляются в поле поверхностной температуры моря, что позволяет использовать модельные оценки времени адвекции t_{ad} для интерпретации спутниковых данных о температуре поверхности моря. Оценки времени подъема придонных вод у берега при действии южных ветров с различными значениями скорости ветра и параметров стратификации вод шельфа по данным численного моделирования могут быть использованы для разработки региональных индексов апвеллинга на основе спутниковых данных температуры поверхности моря и скорости ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Horner-Devine A. R., Hetland R. D., MacDonald D. G.* Mixing and Transport in Coastal River Plumes // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2015. Vol. 47. P. 569–594. doi:10.1146/annurev-fluid-010313-141408
2. *Лемешко Е. М., Цыганова М. В.* Исследование формирования и распространения речного плюма Дуная на основе численного моделирования // *ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. Москва : Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27, ч. 3. С. 32–41. EDN FDPWAN. doi:10.35595/2414-9179-2021-3-27-32-41*
3. *Кондратьев С. И.* Три характерные гидролого-гидрохимические ситуации возле устья Дуная по данным экспедиционных исследований Морского гидрофизического института в 1997–2013 годах // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 4. С. 367–383. EDN VTJNWV. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-367-383
4. *Богданова А. К., Кропачев Л. Н.* Сгонно-нагонная циркуляция и ее роль в гидрологическом режиме Черного моря // *Метеорология и гидрология*. 1959. № 4. С. 26–32.
5. Прибрежный черноморский апвеллинг и межгодовая изменчивость его интенсивности / Р. В. Боровская [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. Вып. 12. С. 42–48. EDN YUCFPP.
6. Прибрежный апвеллинг в северо-западной части Черного моря / А. И. Гинзбург [и др.] // *Исследование Земли из космоса*. 1997. № 6. С. 61–72. EDN LFUSLJ.
7. *Станичная Р. Р., Станичный С. В.* Апвеллинги Черного моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 4. С. 195–207. EDN BNEFXX. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-4-195-207
8. Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга и даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море / А. Г. Зацепин [и др.] // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 2. С. 203–214. EDN VRYSTZ. doi:10.7868/S0030157416020222
9. *Сильвестрова К. П., Мысленков С. А., Ренков Д. С.* Система прогноза ветровых апвеллингов для российского побережья Черного моря // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2022. № 1 (383). С. 89–107. EDN AMWBXE. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-1-89-107>
10. *Дивинский Б. В., Куклев С. Б., Зацепин А. Г.* Численное моделирование события полного апвеллинга в северо-восточной части Черного моря на гидрофизическом полигоне ИО РАН // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 5. С. 683–689. EDN ZMDPIV. doi:10.7868/S0030157417050021
11. *Oguz T., La Violette P. E., Unluata U.* The upper layer circulation of the Black Sea: its variability as inferred from hydrographic and satellite observations // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1992. Vol. 97, iss. C8. P. 12569–12584.
12. Пространственно-временная изменчивость характеристик апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма в 2005–2008 гг. / Э. Н. Михайлова [и др.] // *Системы контроля окружающей среды*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 12. С. 318–321.
13. *Осадчиев А. А.* Речные плюмы. М. : Научный мир, 2021. 286 с.
14. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря / П. О. Завьялов [и др.] // *Океанология*. 2014. Т. 54, № 3. С. 293–308. EDN SEEDFF. doi:10.7868/S0030157414030150

15. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Zatsepin A. G.* Interannual variability of Danube waters propagation in summer period of 1992–2015 and its influence on the Black Sea ecosystem // *Journal of Marine Systems*. 2018. Vol. 179. P. 10–30. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.11.001>
16. *Fong D. A., Geyer W. R.* The alongshore transport of fresh water in a surface-trapped river plume // *Journal of Physical Oceanography*. 2002. Vol. 32, iss. 3. P. 957–972. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<0957:TATOFI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<0957:TATOFI>2.0.CO;2)
17. Coastal upwelling limitation by onshore geostrophic flow in the Gulf of Guinea around the Niger River plume / G. Alory [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 7. 607216. doi:10.3389/fmars.2020.607216
18. *Иванов В. А., Фомин В. В.* Математическое моделирование динамических процессов в зоне море – суша. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 363 с.
19. *Цыганова М. В., Лемешко Е. М., Рябцев Ю. Н.* Моделирование формирования гидрофронта в районе устья Дуная // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2016. № 3. С. 26–31. EDN XAHQUX.
20. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2011. 212 с. EDN XPERZR.

Поступила 20.12.2022 г.; одобрена после рецензирования 23.01.2023 г.; принята к публикации 01.02.2023 г.; опубликована 24.03.2023 г.

Об авторах:

Цыганова Марина Владимировна, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0003-2398-1756**, **ResearcherID: S-5426-2018**, **SPIN-код: 2256-0620**, m.tsyganova@mhi-ras.ru

Лемешко Евгений Михайлович, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0003-4676-1940**, **ResearcherID: S-7815-2018**, **SPIN-код: 3836-5786**

Рябцев Юрий Николаевич, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0002-9682-9969**, **SPIN-код: 7853-4597**, ruab@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Цыганова Марина Владимировна – сбор, систематизация и анализ литературных источников, проведение численных экспериментов, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста и графических материалов статьи

Лемешко Евгений Михайлович – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи

Рябцев Юрий Николаевич – разработка математической модели, выбор и обоснование методов решения уравнений, коррекция математической модели

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Морфодинамика севастопольских бухт под воздействием антропогенной деятельности

Т. В. Ефремова *, Ю. Н. Горячкин

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: efremova@mhi-ras.ru*

Аннотация

Деграляция берегов Крыма под влиянием антропогенного фактора стала серьезной проблемой, на преодоление которой затрачиваются значительные усилия и финансовые средства. Цель статьи – ретроспективно рассмотреть морфодинамику севастопольских бухт под воздействием хозяйственной деятельности. Использовались материалы наблюдений МГИ РАН, космические и аэрофотоснимки, литературные источники, а также массив карт и планов, главным образом XIX в. Показано, что в результате антропогенной деятельности природная среда севастопольских бухт существенно изменилась. Наибольшее воздействие на морфодинамику отмечается в районе Севастопольской бухты, где берега подверглись значительному антропогенному влиянию (срытие клифов, бетонирование береговой линии, строительство молов, пирсов и т. п.). Берега, которые можно отнести к непреобразованным, сохранились лишь на протяжении 1.1 км (3 % от первоначальной длины) береговой линии. Внешние берега бухт взморья в наибольшей степени сохранили природное состояние. Антропогенному воздействию, выразившемуся в срезке и планировании клифов, а также устройстве берегозащитных и пляжеудерживающих сооружений, подверглось только 1.3 км (17 %) береговой линии. Значительно большее воздействие испытали берега бухт взморья. Только в одной из них сохраняется средний уровень техногенной нагрузки, в трех он максимальный, а в трех – экстремальный. Из 33.5 км внутреннего периметра бухт относительно неизменными остаются около 10 км (30 %). К настоящему времени в рассматриваемом регионе от ранее существовавших берегов с песчаными пляжами осталось только 0.3 км, или 10 %. Отмечается, что в результате антропогенной деятельности почти уничтожена Севастопольская группа соленых озер, ранее использовавшаяся в лечебных целях.

Ключевые слова: Черное море, севастопольские бухты, морфодинамика, антропогенное воздействие, береговая линия, соленые озера, аккумулятивные берега, абразионные берега

Благодарности: работа выполнена в рамках выполнения государственного задания FNNN-2021-0005.

© Ефремова Т. В., Горячкин Ю. Н., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Ефремова Т. В., Горячкин Ю. Н. Морфодинамика сева­стопольских бухт под воздействием антропогенной деятельности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 31–47. EDN ТНААМХ. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-31-47

Morphodynamics of Sevastopol Bays under Anthropogenic Impact

T. V. Efremova*, Yu. N. Goryachkin

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: efremova@mhi-ras.ru

Abstract

The degradation of the Crimean shores under the influence of the anthropogenic factor has become a serious problem to overcome which significant efforts and financial resources are spent. The purpose of the article is to consider retrospectively the morphodynamics of Sevastopol bays under the influence of anthropogenic activity. We used materials of MHI RAS observations, satellite and aerial photographs, literary sources as well as a range of maps and plans, mainly of the 19th century. It is shown that the natural environment of Sevastopol bays has changed significantly as a result of anthropogenic activity. The greatest impact is noted in the area of Sevastopol Bay, where the shores have been subjected to significant anthropogenic impact (the removal of cliffs, concreting of the coastline, construction of piers, etc.). The shores, which can be classified as untransformed, have survived only on 1.1 km (or 3 %) of the original length of the coastline. The outer shores of the coastal bays have preserved their natural state to the greatest extent. Only 1.3 km (17 %) were subject to anthropogenic impact consisting in cutting and planning of cliffs and erection of coastal protection and beach-retaining structures. The shores of the coastal bays themselves were subject to a much greater impact. Only one of them preserves the average level of technogenic impact, whereas in three of them it is the maximum, and in three others it is extreme. Out of 33.5 km of the inner perimeter of the bays, about 10 km (30 %) remain relatively unchanged. It is noted that by now only 0.3 km or 10 % of the pre-existing shores with sandy beaches have remained in the region under consideration. It is observed that as a result of anthropogenic activity, the Sevastopol group of salt lakes, which were previously used medicinally, has been almost destroyed.

Keywords: Black Sea, Sevastopol bays, morphodynamics, anthropogenic impact, coastline, salt lake, accumulative shore, abrasion shore

Acknowledgments: The work was carried out under state assignment no. FNNN-2021-0005.

For citation: Efremova, T.V. and Goryachkin, Yu.N., 2023. Morphodynamics of the Sevastopol Bays under Anthropogenic Impact. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 31–47. EDN ТНААМХ. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-31-47

Введение

Разнообразные и сложные природные процессы различных масштабов постоянно преобразуют побережье. При этом региональные характеристики береговой зоны определяют различные взаимодействия и относительную важность отдельных природных процессов. Человеческая деятельность – это еще один фактор, влияющий на преобразование побережья. Она видоизменяет природную среду и естественные процессы как прямо, так и косвенно.

Начиная с XX в. воздействие антропогенного фактора настолько усилилось, что в отдельных районах существенно превысило даже воздействие природных процессов. Урбанизация, развитие экономики и коммуникаций и связанное с ними строительство до неузнаваемости изменили естественные ландшафты отдельных побережий, что, с одной стороны, несомненно, имело положительную составляющую, но с другой – привело к ряду негативных последствий. Таких примеров немало и на побережье Черного моря [1–3].

Деграляция берегов в рекреационных зонах Крыма под воздействием антропогенного фактора стала серьезной проблемой, на преодоление которой затрачиваются значительные усилия и финансовые средства. Так, Южный берег Крыма почти полностью утратил свои первоначальные прибрежные ландшафты вследствие берегоукрепительных мероприятий. На отдельных участках побережья ценные аккумулятивные пляжи исчезли частично или полностью (г. Евпатория, пгт Николаевка, с. Песчаное). Подробно антропогенное воздействие на крымское побережье рассмотрено в [4].

Полная библиография по проблематике изучения береговой зоны Крыма, доступная на сайте библиотеки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН», почти не содержит работ, посвященных Севастопольскому региону. Как правило, он упоминается в числе других, и информации о нем немного. Это вполне объяснимо, поскольку в регионе долгое время была база ВМФ СССР, что ограничивало возможность публикации. После распада СССР долгое время исследования практически не проводились и возобновились фактически 15 лет назад. Цель статьи – ретроспективно рассмотреть морфодинамику севастопольских бухт под воздействием хозяйственной деятельности.

Материалы и методы исследования

В работе использовались материалы наблюдений МГИ РАН, космические и аэрофотоснимки, литературные источники, а также массив карт и планов (главным образом XIX в.), хранящихся в Морской библиотеке Севастополя.

Результаты и обсуждение

В рассматриваемом регионе можно выделить два района.

Первый – это собственно Севастопольская бухта общей длиной в настоящее время около 7.5 км и протяженностью по периметру от входных искусственных молов 31.9 км (рис. 1). Бухта образовалась вследствие затопления устьевой части р. Черной в ходе послеледникового подъема уровня моря. Северный и южный берега Севастопольской бухты, включая Южную бухту, первоначально представляли собой клифы из сарматских известняков высотой до 30–80 футов (10–25 м) [5]. Прибрежный рельеф изрезан балками, продолжениями которых являются более мелкие бухты и вогнутости береговой линии. До освоения берег можно было отнести к абразионно-бухтовому ингрессионному риасового типа. О риасовом типе берега, характерном только для этого района Черного моря, указывалось в известной монографии В. П. Зенковича¹⁾.

¹⁾ Зенкович В. П. Морфология и динамика советских берегов Черного моря. Москва : Изд-во АН СССР, 1960. Т. 2. 216 с.



Р и с . 1 . Космический снимок бухт Севастополя, цифрами обозначены рассматриваемые в тексте районы (URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/>)

Fig. 1. Space image of the bays of Sevastopol, the numbers indicate the areas considered in the text (URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/>)

Вследствие своей конфигурации бухта подвержена воздействию волнения только западного направления. До строительства входных молов в 1970-х гг. ширина входа в бухту составляла 1.2 км, после строительства она уменьшилась до 0.4 км. Вследствие этого в настоящее время значительное волнение почти не проникает в бухту, а абразия немногих сохранившихся участков клифа почти равна нулю, чему способствуют и глыбовые навалы на урезе. По нашим подсчетам, к 2022 г. берега, которые с некоторыми оговорками можно отнести к непреобразованным, сохранились лишь на 1.1 км (3 % от первоначальной длины) береговой линии. Почти все они находятся на северной стороне бухты.

Берега района с начала XIX в. подвергались значительному антропогенному влиянию – это бетонирование береговой линии, строительство молов, пирсов и т. п. Кроме того, значительные участки клифов были полностью срыты. Так, в Южной бухте на Корабельной стороне в 1830–1840 гг. в ходе строительства Лазаревского адмиралтейства была вручную срыта целая гора скальной породы объемом 200 000 м³. При строительстве фортов, защищающих город с моря, клифы также срезались. Это, прежде всего, район современного Приморского бульвара (на месте не сохранившегося самого большого форта – Николаевского), Константиновского, Михайловского и Павловского фортов.

В настоящее время берег Севастопольской бухты уверенно можно отнести к антропогенному. Длина современной береговой линии, занятой гидротехническими объектами, составляет 37 700 м, об экстремальной техногенной нагрузке свидетельствует введенный в [6] коэффициент – 1.18.

Второй район протянулся субширотно к западу от южного входного мола до м. Херсонес. По прямой линии это расстояние составляет 10.5 км, а по периметру бухт – 41.1 км. Этот участок берега вместе с южной частью Севастопольской бухты формирует северное побережье Гераклеяского полуострова. Затопленные устья длинных и глубоких балок образуют семь основных бухт. Отношение длины этих бухт к их ширине в устье составляет от 0.8 (Песочная) до 5.5 (Стрелецкая) (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Морфометрические характеристики севастопольских бухт

T a b l e 1. Morphometric characteristics of Sevastopol bays

Бухта / Bay	Длина (км) / Length (km)	Ширина (км) / Width (km)	Длина/Ширина / Length/Width
Севастопольская / Sevastopol	7.5	1.2	6.3
Карантинная / Karantinnaya	1.3	0.6	2.4
Песочная / Pesochnaya	0.3	0.4	0.8
Стрелецкая / Streletskaaya	2.2	0.4	5.5
Круглая / Kruglaya	1.3	0.6	2.2
Абрамова / Abramova	0.8	0.6	1.3
Камышовая / Kamyshovaya	2.5	0.9	2.8
Казачья / Kazachya	3.0	1.1	2.7

Берега между бухтами представлены абразионным клифом, сложенным слоистыми сарматскими известняками, его высота последовательно уменьшается от 25 м на востоке до выклинивания у м. Херсонес. Здесь на берегу присутствует вал из крупных неокатанных обломков известняка высотой до 1 м. У подножья клиф окаймлен бенчем, на урезе расположены нагромождения из глыб крупных обломков известняка. В вогнутостях берега имеются узкие (шириной 5–7 м) пляжи из глыб и крупной гальки. На клифах образуются волноприбойные ниши, которые в наибольшей степени интенсифицируют естественное разрушение берегов (под воздействием атмосферных осадков, эоловых и химических процессов и др.) в виде обвалов. Поэтому скорость абразии клифов можно оценить только приблизительно, на больших временных масштабах. Средняя скорость отступления берега, рассчитанная по данным повторных топографических съемок городища Херсонеса за последнее столетие, составила 2.3–2.5 м [7]. Сектор активного волнового воздействия на этот район заключен в узком диапазоне от запада до севера. Даже при относительно небольшом разгоне волн тут нередко развивается штормовое волнение.

Рекреационными пляжами на открытом берегу являются искусственные галечные пляжи парка Победы, комплекса «Акварин» и кадетского училища на водоразделе бухт Круглой и Стрелецкой. Материал пляжей довольно успешно удерживается с помощью системы бун. Внешние берега второго района в наибольшей степени сохранили природное состояние. Из 7.6 км внешнего берега антропогенному преобразованию подверглось только 1.3 км (17 %).

Таблица 2. Морфометрические характеристики севастопольских бухт и коэффициенты техногенной нагрузки

Table 2. Morphometric characteristics of Sevastopol bays and technogenic impact coefficients

Бухта / Bay	Длина побережья (м) / Coast length (m)	Линейные размеры гидротехнических сооружений (м) / Linear dimensions of hydrotechnical structures (m)	Коэффициент техногенной нагрузки (К) / Technogenic impact coeffi- cient (K)
Карантинная / Karantinnaya	3700	1775	0.47
Песочная / Pesochnaya	1029	1087	1.05
Стрелецкая / Streletskaaya	6007	3264	0.54
Круглая / Kruglaya	3466	3312	0.95
Абрамова / Abramova	2370	1637	0.69
Камышовая / Kamyshovaya	7280	8640	1.18
Казачья / Kazachya	9670	3577	0.37

Почти все эти участки расположены между бухтами Круглой и Стрелецкой. Антропогенное воздействие здесь выразилось в срезке и планировании клифов, устройстве берегозащитных и пляжеудерживающих сооружений.

Существенно большему воздействию человека подверглись пространства самих бухт, причем это воздействие постоянно возрастает. Как видно из табл. 2, только в Казачьей бухте сохраняется средний уровень техногенной нагрузки, в трех он экстремальный (бухты Песочная, Абрамова и Камышовая), в остальных – максимальный. Из 33.5 км внутреннего периметра бухт относительно неизменными остаются около 10 км (30 %).

В устьях бухт перемещение наносов направлено к кутовым частям, это наиболее выражено в относительно мелководных бухтах с широким устьем (см. табл. 1), в кутовых частях которых образовывались аккумулятивные формы. У подножья клифов, примыкающих к внешней стороне бухт, существуют узкие (до 5 м) пляжи из слабо окатанных обломков известняка. Песчаные фракции характерны преимущественно для кутовых частей бухт.

В рассматриваемом регионе аккумулятивные формы занимали незначительные участки побережья, и ранее о них в научной литературе почти ничего не говорилось. Между тем здесь существовали пересыпи, отделявшие море от соленых озер. В настоящее время можно говорить, что под влиянием человека озера и, соответственно, пересыпи исчезли как ландшафт и форма рельефа.

В Крыму существует четыре группы соленых озер – Керченская, Тарханкутская, Евпаторийская и Перекопская²⁾. С незапамятных времен в них добывали соль, в конце XIX в. озера Крыма давали 40 % всей добычи России. Начиная с XX в. и по настоящий момент лечебная грязь озер Евпаторийской группы использовалась в медицинских целях, а рапа – как сырье для химической промышленности (производство брома, окиси магния и др.). С 1930-х гг. такое производство было развернуто и на Перекопской группе озер.

Соленые озера Крыма в зависимости от особенностей питания (море, поверхностный или подземный сток) обычно подразделяют на две группы: *континентальные*, с преобладанием поверхностного или подземного стока, и *морские*, в питании которых, кроме вод поверхностного и грунтового стока, имеет значение море²⁾. В этой группе выделяются две подгруппы, одна из которых включает лиманы и заливы, сохранившие сообщение с морем. Ко второй относятся озера, отделенные от моря сплошными пересыпями, через которые происходит относительно слабая фильтрация морской воды. Кроме этого, морские воды в штормовую погоду могут прорываться через пересыпи. Эта подгруппа охватывает большинство озер Крыма, как и рассматриваемые ниже соленые озера Севастопольской группы, которые не входили ни в одну классификацию. Это связано с тем, что сейчас осталось только одно озеро из существовавших ранее по меньшей мере девяти (рис. 2). Для сравнения в Евпаторийской группе 14 озер, в Керченской – 10.

Упоминание о соленых озерах Севастопольского региона есть в работе [8], в которой выделяют Херсонесскую группу озер, однако к моменту выхода этой работы указанные в ней озера давно не существовали, о некоторых из этих озер кратко писал В. П. Зенкович в работе¹⁾.

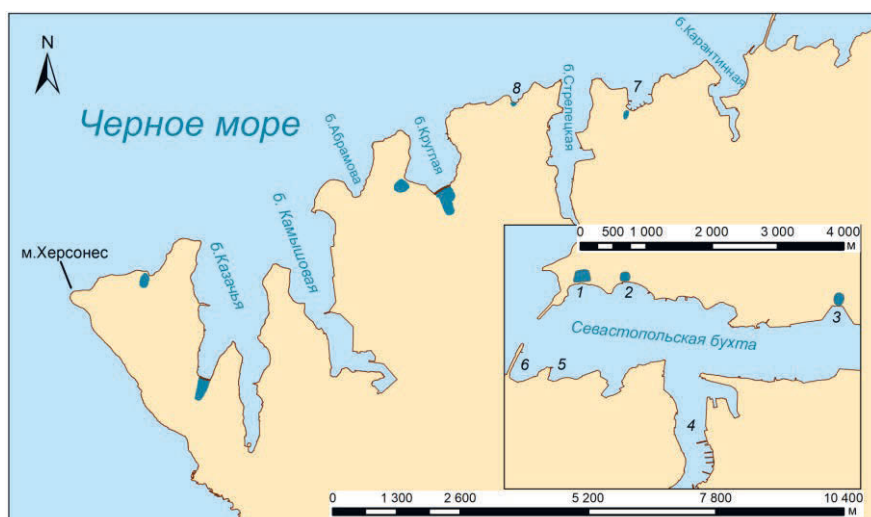


Рис. 2. Места расположения соленых озер в бухтах г. Севастополя

Fig. 2. Locations of salt lakes in the bays of Sevastopol

²⁾ Понизовский А. М. Соляные ресурсы Крыма. Симферополь : Изд-во «Крым», 1965. 162 с.



Рис. 3. Фрагмент побережья Северной стороны Севастополя: *сверху* – на первой карте штурмана Батурина (1773 г.); *снизу* – на карте штурмана Радионова (1840 г.). Стрелками показаны озера

Fig. 3. A fragment of a map of the coast of the northern side of Sevastopol. Above – on the first map by navigator Baturin (1773). Below – on the map by navigator Radionov (1840). The arrows show the lakes

В первом районе существовали три озера: два в низменностях по обе стороны от водораздела между Константиновским и Михайловским фортами, бухты Константиновская и Матюшенко, (цифры 1 и 2 на рис. 2); третье располагалось в Панайотовой балке (цифра 3 на рис. 2). Эти озера обозначены на первой карте Севастополя штурмана Батурина, 1773 г. (рис. 3).

Впервые контуры озер были подробно приведены на карте 1840 г. Площадь каждого из них составляла 30–40 тыс. м², они существовали вплоть до Первой мировой войны.

На месте озера в Панайотовой (сейчас Доковой) балке в 1915 г. был построен самый большой в городе сухой док. В это же время на месте озера в бухте Матюшенко была развернута база гидросамолетов, сейчас здесь пустырь, заросший частично камышом. Озеро у Константиновского форта было ликвидировано в 1930-х гг., в настоящее время здесь жилая застройка.

На месте бывших пересыпей сохранились небольшие фрагменты песчаных пляжей. Очевидно, что питание аккумулятивных форм (пересыпей) и их образование в этом районе связано с существованием обширной песчаной отмели в районе Северной косы, о которой писал Паллас по результатам обследования 1793 г.: «...перед Северной косой есть малая песчаная мель» [5, с. 37]. Автор [9], отмечая вытянутое с севера на юг валообразное возвышение высотой 1–2 м западнее входных молов в Севастопольскую бухту, делает предположение, что это остатки пересыпи на входе в бухту, образовавшейся при положении берега ниже современных отметок, когда эстуарий р. Черной представлял собой лиман.

На упомянутой выше первой карте Севастополя вдоль берега от Северной косы до бухты Матюшенко обозначена сплошная полоса песка (рис. 3). Интересно, что сравнение карт за различные годы показывает, что в настоящее время площадь отмели увеличилась, а глубины в ней уменьшились, что можно связать с возведением в 1970-х гг. северного мола у Константиновского форта длиной 250 м, прервавшим вдольбереговую поток наносов. Здесь уместно отметить, что после возведения южного мола длиной 500 м поступление наносов в Северную бухту полностью прекратилось, а водообмен, по некоторым оценкам, уменьшился втрое [10]. Из анализа старинных карт видно, что ранее аккумулятивные формы в виде песчаных отмелей имелись в Южной, Александровской и Мартыновой бухтах (цифры 4, 5, 6 на рис. 2). Сейчас фрагменты этих форм остались только в Александровской бухте.

Во втором районе, в северной части Гераклеяского полуострова, насчитывалось шесть озер. Одно из них находилось в Песочной бухте (цифра 7 на рис. 2). Площадь его была невелика – около 10 000 м². На базе илов этого озера в конце XIX – начале XX в. функционировала грязелечебница. Как и пересыпи озер Северной стороны, пересыпь в Песочной бухте была сложена средне- и мелкозернистым песком с преобладанием последнего. Пересыпь, в отличие от озера, сохранилась до настоящего времени в виде пляжа «Песочный». Однако его рекреационные свойства сомнительны, поскольку из-за ошибочного проектного решения сюда поступает щебень с соседнего искусственного пляжа. В результате на пляже присутствует как исходный песчаный материал, слагающий основное тело пляжа, так и щебень, сконцентрированный в приурезовой полосе шириной до 15 м.

Два соленых озера находились в южной и западной частях бухты Круглой, от моря их отделяли две песчаные пересыпи [11]. Вот как они описаны у Палласа: «Круглая бухта основательно носит свое название. Она не достигает одной версты в длину и ширину и глубиной не более 6 сажень (11 м); имеет внутри маленький островок с малыми глубинами воды вокруг, а на берегу – два соленых озера; одно из них отделяется от бухты в ее глубине только узкой пересыпью, а другое, с западной стороны, более широким перешейком» [5, с. 41].

В западной части бухты до середины XIX в. функционировала грязелечебница, использовавшая илы озера. По аэрофотоснимку 1942 г., пересыпь в южной части имела длину около 400 м, ширину – до 80 м, в западной соответственно 150 и 40 м. Площадь южного озера составляла около 80 000 м², а западного – 15 000 м². В 1950–1960-х гг. пересыпь южного озера была почти

полностью разобрана на строительный песок, а озеро превратилось в мелководную (глубины менее 0.5 м) кутовую часть бухты. Еще в середине 1990-х гг. здесь сохранялась часть пересыпи с пляжем. В начале XXI в. она была засыпана грунтом, на котором были построены апартаменты. Что касается западного озера, то в настоящее время оно засыпано строительным мусором, поросшим камышом.

На месте бывшей пересыпи южного озера рельеф дна сейчас представляет собой аккумулятивные формы в виде подводных отмелей, сложенных песчаными фракциями. Начиная с 2015 г. южнее существовавшей ранее пересыпи формируется новая, в настоящее время ее длина составляет 45 м, а ширина – около 25 м (рис. 4).

Корневая часть новой косы формируется южнее на 400 м ранее существовавшей. Это связано с тем, что единый вдольбереговой поток наносов в бухте прерван из-за постройки трех бун севернее, а источник питания (подсыпaeмый перед курортным сезоном на пляж песок) находится южнее их. Песок во время штормов мигрирует в кутовую часть. То есть мы видим стремление литодинамической системы бухты Круглой (при наличии источников питания) к возврату в исходное равновесное состояние. По данным промера, глубины в кутовой части, где расположена база маломерного флота, уменьшаются, т. е. продолжается процесс аккумуляции наносов. Вместе с тем поток наносов в самой бухте невелик, на что указывает видимое отсутствие аккумуляции наносов со стороны моря у возведенных бун. Городские власти планировали засыпать кутовую часть бухты. Планировалось и срытие остатков островка для улучшения судоходства. Эти планы основывались на ошибочном представлении о литодинамике бухты.



Р и с . 4. Место примыкания формирующейся песчаной косы на космических снимках на месте бывшего соленого озера: *слева* – 2009 г.; *справа* – 2020 г.

F i g . 4. The junction of the emerging sand spit on satellite images at the place of the former salt lake. Left – 2009, right – 2020



Р и с . 5 . Островок в центре Круглой бухты на фрагментах карты 1854 г.³⁾ (слева) и 1856 г.⁴⁾ (справа)

F i g . 5 . An islet in the center of Kruglaya Bay on the map of 1854 (left) and 1856 (right)

В центральной части бухты существует поднятие дна, которое в период наиболее низкого стояния уровня выступает над поверхностью воды. Его длина составляет около 150 м, ширина от 20 до 90 м. На старинных картах данная форма рельефа обозначалась как небольшой островок (рис. 5). По происхождению он, по-видимому, является останцом, на котором были сооружены античные постройки. Это было возможно, так как в то время уровень моря был на 2–3 м ниже современного. Косвенно это подтверждается наличием в западной части бухты волноприбойных ниш на глубине около 2 м, найденных нами при обследовании дна.

Подводные исследования в бухте проводила экспедиция отдела подводной археологии Музея-заповедника «Херсонес Таврический» [12, 13]. Находки артефактов позволили предполагать существование на островке сооружения общественного или религиозного назначения. На южной стороне отмели с помощью водолазного обследования и съемки с квадрокоптера выявлена каменная насыпь протяженностью около 60 м и шириной 20 м, существование которой, предположительно, было связано с использованием акватории бухты в качестве гавани. Еще 100 лет назад большая часть дна бухты была покрыта слоем песка и были сформированы широкие песчаные пляжи

³⁾ Harbour of Sevastopol or Akhtiar, the antient Ctenus. From a Russian MS with additional soundings : map / by Captain E. Lyons R.N., H.M.S. Scale : [circa 1:40,000]. G236:6/39. [London] : Hydrographic Office, 1854. 1 map ; 57.5 × 34 cm.

⁴⁾ Sevastopol, shewing the Russian defence works and the approaches of the allied armies : map / by Lieut. Geo. R. Wilkinson, R.N. ; Capt. T. Spratt, R.N.C.B. 1 : 18,300. [London] : Hydrographic Office, 1856. 1 map : col. ; 77 × 118 cm.

(обследование С. А. Зернова в 1912 г.⁵⁾). К настоящему времени количество песка существенно уменьшилось вследствие его отбора, так как берег и дно абрадируют под воздействием волнения достаточно медленно из-за поднятия в центре бухты, гасящего энергию волн.

Значительное по размеру соленое озеро существовало в кутовой части Казачьей бухты. По данным работы [5], длина озера в конце XVIII в. составляла около 130 саженей (238 м); низкая отделяющая его пересыпь имела 60 саженей длины и 23 ширины (110 и 49 м соответственно), из которой 14 саженей (26 м) составляло плоское белое побережье, по-видимому, иногда заливаемое.

Далее в [5, с. 41] отмечается: «В соляном озере дно столь же бело, как и в заливе; уровень воды в нем летом... казался гораздо ниже, чем в заливе». Площадь озера, по-видимому, составляла около 60 000 м². По пересыпи в течение долгих лет проходила грунтовая дорога. В 1950-х гг. большая часть пересыпи, как и в бухте Круглой, была разобрана на строительный песок. В настоящее время сохранилась небольшая часть косы в восточной части бухты (рис. 6). Она сложена песком с примесью окатанных обломков известняка. Анализ космических снимков показывает современное накопление наносов в районе бывшей пересыпи.

Небольшое соленое озеро до начала XXI в. существовало в вогнутости берега на месте современного комплекса «Аквамарин» (цифра 8 на рис. 2). Площадь озера составляла около 1000 м², а пересыпь имела длину около 60 м при ширине 10 м. Она была сложена в основном окатанными обломками известняка. В 2010 г. озеро было засыпано, а на его месте сооружена набережная.



Р и с . 6 . Остаток пересыпи соленого озера в Казачьей бухте

F i g . 6 . The remnant of the saline lake bay-bar in Kazachya Bay

⁵⁾ Зернов С. А. К вопросу об изучении жизни Черного моря. СПб., 1913. 280 с. (Записки Императорской академии наук по физико-математическому отделению ; т. 32, № 1). URL: <https://elibrigo.ru/handle/123456789/217532> (дата обращения: 7.02.2023).

Наконец, единственное сохранившееся до наших дней озеро находится у м. Херсонес. Вот как оно описано в [5, с. 41]: «Имеется еще соляное озеро... в 60 сажень (110 м. – *Прим. авт.*) длины на лопатовидном мысе, которым кончается Крым на северо-западе. Это озеро тоже, по-видимому, было частью залива, и его пересыпь образована накатом волн, снесших ил и гравий в плотину, имеющую длину почти в 60 сажень при ширине около 20, одной вышины с берегом; все окружено обломками камней, как маленьким валом, так что теперь в этом озере, отделенном от моря, садится соль, что, однако, не случается ежегодно. Эта соль – хотя и дурного качества, ибо [озеро] насыщено горькой солью, употребляется и берется татарами из соседних горных деревень, вынужденных отвозить бесплатно десятый воз владельцу в Ахтиар; то же делается и относительно озер Круглой бухты. Несколько соляных низин, почти сухих, видимых на этом мысе в расстоянии 60 сажень от маяка, по-видимому, имеют такое же происхождение и отделяются от моря береговыми, низкими набросками, уподобляющимися каменным стенам».

В настоящее время озеро двойное, в его южной, кутовой части имеется еще одна пересыпь, обе они сложены обломками известняка. Площадь озера составляет около 15 000 м², длина пересыпи – 150 м, ширина – до 30 м. Ландшафт окружающей местности – озерно-лиманный с галофитной растительностью [14] (рис. 7).

В 2016 г. южная часть озера была засыпана при строительстве дороги. В настоящее время озеро находится в режимной зоне и недоступно для исследования. В целом можно сказать, что пересыпи второго района образовались в относительно широких и открытых бухтах с небольшой глубиной, где значительное волнение может доходить до их кутových частей. В других бухтах перемещение наносов или создавало косы, или заполняло вогнутости береговой линии.



Рис. 7. Последнее оставшееся соляное озеро в Севастопольском регионе

Fig. 7. The last remaining salt lake in the Sevastopol region

Так, в верховьях Камышовой бухты, на ее восточном берегу, существовала небольшая окаймляющая аккумулятивная форма – Марфина коса. В послевоенное время слагающий ее песок был использован в качестве строительного материала. Судя по старинным картам, за достаточно короткий период в XX в. была занесена песком короткая балка на западном берегу центральной части Стрелецкой бухты. В античное время была «засыпана жителями города» или «затянута песком в результате перемещения морских наносов» и балка в центральной части бухты Карантинной, являвшаяся внутренней гаванью древнего Херсонеса [15, с. 8].

По нашим подсчетам, пересыпи озер с песчаными пляжами в первом районе ранее занимали около 1.1 км береговой линии, во втором районе – 1.5 км, а в сумме – 2.6 км. Это немного по отношению к общей длине берега, однако к настоящему времени осталось только 0.3 км (10 %) берега с песчаным пляжем.

Значительные преобразования под воздействием антропогенной деятельности претерпела устьевая часть р. Черной, впадающей в Севастопольскую бухту. В послеледниковое время в морском устье реки сформировались мощные морские, лиманно-морские и аллювиальные отложения. В середине XIX в. устье реки представляло собой заболоченную местность – дельту реки с многочисленными рукавами. На старинных картах видно, что на взморье реки существовал широкий бар с глубинами до 1 м. Еще более древняя внутренняя дельта реки, остатки которой прослеживаются до сих пор, располагалась в районе современного моста. Вероятно, устьевой участок реки и Инкерманского лимана во время очередной трансгрессии был затоплен морем, затем в результате заполнения осадками и регрессии моря морская стадия развития устья сменилась лиманной, а позже речной, и устье приобрело современный рельеф [16]. В настоящее время на месте заболоченной дельты расположена глубоководная акватория. Конфигурация берегов антропогенно изменена сооружением молов, причалов, дамб и других гидротехнических сооружений на насыпных грунтах. Основные преобразования устья р. Черной заключались в сооружении ковша Севастопольского морского порта (в Инкермане), создании искусственного водоема площадью около 0.4 км² на устьевом участке реки и месте пойменного болота, прорытия судоходного канала (рис. 8). Сейчас территория представляет собой сплошную промышленную зону. В последние годы под видом выравнивания береговой линии производится незаконная добыча песка.

Значительные заболоченные участки на месте впадения временных водотоков ранее находились и в кутовых частях Южной и Артиллерийской бухт. Еще в XIX в. их засыпали грунтом, извлеченным при срытии клифов: в Южной бухте при строительстве Лазаревского адмиралтейства (см. выше), в Артиллерийской бухте при возведении Николаевского форта. На месте бывшего болота в Южной бухте сейчас находятся железнодорожный и автовокзал. Небольшие заболоченные участки в устьях временных водотоков сейчас сохранились только в Стрелецкой и Казачьей бухтах.



Р и с . 8. Устье р. Черной: на фрагменте карты 1773 г. (слева), на космическом снимке 2021 г. (справа) (URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/>)

Fig. 8. The mouth of the Chernaya River: on 1773 map (left), on 2021 space image (right) (URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/>)

З а к л ю ч е н и е

На основании вышеизложенного можно сделать следующие основные выводы:

- в результате антропогенной деятельности природная среда сева­стопольских бухт существенно изменилась;
- наибольшее воздействие отмечается в районе Севастопольской бухты, где берега подверглись значительному антропогенному изменению: сры­вались клифы, бетонировалась береговая линия, строились молы и пирсы и т. п. Берега, которые можно отнести к непреобразованным, сохранились лишь на 1.1 км (или на 3 % от первоначальной длины) береговой линии. Степень техногенной нагрузки – экстремальная;
- внешние берега бухт взморья в наибольшей степени сохранили при­родное состояние. Антропогенному воздействию, выразившемуся в срезке и планировании клифов, устройстве берегозащитных и пляжеудерживающих сооружений, подверглось только 1.3 км (17 %) из 7.6 км береговой линии;
- существенно бóльшему воздействию человека подверглись берега бухт взморья, причем это воздействие постоянно возрастает. Только в одной бухте сохраняется средний уровень техногенной нагрузки, в трех он экстремальный и в трех – максимальный. Из 33.5 км внутреннего периметра бухт относи­тельно неизменными остаются около 10 км (30 %);
- в результате антропогенной деятельности почти уничтожена Сева­стопольская группа соленых озер, ранее использовавшаяся в лечебных целях. Осталось только одно озеро из существовавших ранее по меньшей мере девяти;
- к настоящему времени в рассматриваемом регионе от ранее существо­вавших берегов с песчаным пляжем осталось только 0.3 км (10 %);
- значительные преобразования под воздействием антропогенной деятель­ности претерпела устьевая часть р. Черной и заболоченные участки на месте впадения в­ременных водотоков, которые ранее находились в кутовых частях бухт, в XIX в. засыпанные грунтом, извлеченным при срытии клифов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beach erosion and coastal protection plan along the southern Romanian Black seashore / K. Kuroki [et al.] // Coastal Engineering. Proceedings of the 30th International Conference, San Diego, California, USA, 3–8 September 2006. World Scientific, 2006. P. 3788–3799. doi:10.1142/9789812709554_0318
2. Longshore sediment transport at Golden Sands (Bulgaria) / H. Nikolov [et al.]. Oceanologia. 2006. Vol. 48, iss. 3. P. 413–432. URL: <https://www.iopan.gda.pl/oceanologia/483nikol.pdf> (date of access: 7.02.2023).
3. Long-term coastal changes of Varna bay caused by anthropogenic influence / M. Stancheva [et al.] // Geo-Eco-Marina. 2011. Iss. 17. P. 33–40. doi:10.5281/zenodo.56892
4. Горячкин Ю. Н., Ефремова Т. В. Антропогенное воздействие на литодинамику береговой зоны черноморского побережья Крымского полуострова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 1. С. 6–30. doi:10.22449/2413-5577-2022-1-6-30
5. Паллас П. С. Наблюдения, сделанные во время путешествия по южным местностям Русского государства в 1793–1794 годах. Москва : Наука, 1999. 246 с.
6. Айбулатов Н. А., Артюхин Ю. В. Геоэкология шельфа и берегов Мирового океана. СПб. : Гидрометеиздат, 1993. 304 с.
7. Лебединский В. В., Пронина Ю. А. Изучение древней береговой линии Херсонесе Таврического и его хоры // Херсонесский сборник. Севастополь, 2014. Вып. 18. С. 97–116. EDN YMQY TZ.
8. Олиферов А. Н., Тимченко З. В. Реки и озера Крыма. Симферополь : Доля, 2005. 214 с.
9. Мысливец В. И. Взаимоотношения природы и человека на побережье Юго-западного Крыма // Альманах Пространство и Время. 2017. Т. 14, вып. 1.
10. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.]. Севастополь : МГИ НАНУ, 2006. 90 с. URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf (дата обращения: 7.02.2023).
11. Удовик В. Ф., Харитонова Л. В., Горячкин, Ю. Н. Мониторинг состояния городских пляжей Севастополя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. № 4. С. 86–94.
12. Букатов А. А. Подводные археологические исследования в бухте Круглая // Вопросы подводной археологии. 2020. № 11. С. 22–29. EDN GXFFGR. doi:10.24412/2220-0959-2020-11-22-29
13. Букатов А. А., Бондарев И. П., Дюженко Т. В. К вопросу о существовании гавани Херсонеса в бухте Круглая // Херсонесский сборник. Севастополь, 2020. Вып. 21. С. 7–16. EDN OUIAPI.
14. Панкеева Т. В., Бондарева Л. В. Методические подходы к ландшафтно-созологической оценке прибрежных комплексов // Экосистемы, их оптимизация и охрана. 2014. Вып. 11. С. 57–67. EDN VKCZGF.
15. Букатов А. А., Бондарев И. П., Дюженко Т. В. Порт Херсонеса Таврического в Карантинной бухте и природные процессы // Херсонесский сборник. Севастополь, 2019. Вып. 20. С. 7–20.
16. Миньковская Р. Я., Демидов А. Н. Эволюция морского устья реки Черной (Севастопольский регион) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. № 1. С. 81–88. EDN VUYZOZ.

Поступила 24.11.2022 г.; одобрена после рецензирования 23.01.2023 г.;
принята к публикации 01.02.2023 г.; опубликована 24.03.2023 г.

Об авторах:

Ефремова Татьяна Владимировна, ведущий инженер, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0001-8045-6320**, *efremova@mhi-ras.ru*

Горячкин Юрий Николаевич, главный научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2807-201X**, **ResearcherID: I-3062-2015**, *yngor@mhi-ras.ru*

Заявленный вклад авторов:

Ефремова Татьяна Владимировна – постановка проблемы, обработка и анализ данных, подготовка текста статьи и картографического материала

Горячкин Юрий Николаевич – постановка проблемы, обработка и анализ данных, подготовка текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Межгодовая изменчивость режимов циркуляции вод Северного Ледовитого океана

Е. Е. Лемешко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
e-mail: e.lemeshko@mhi-ras.ru

Аннотация

Статья посвящена изучению межгодовой изменчивости режимов циркуляции вод Северного Ледовитого океана по данным альтиметрии для области от 65° до 89.75° с. ш., включая область океана, покрытую льдом. Цель работы заключается в исследовании изменчивости уровня океана и скоростей поверхностных геострофических течений в зависимости от величины индекса арктической осцилляции, а также в установлении количественных закономерностей между ними. Дополнительно рассмотрено влияние различных режимов циркуляции океана и величины индекса арктической осцилляции на изменчивость стерического уровня как индикатора процессов распреснения/осолонения в полярной области севернее 81.5° с. ш. Стерическая компонента уровня рассчитывалась как разница между динамической топографией по данным альтиметрии и данными *GRACE* о манометрической компоненте уровня. На межгодовом масштабе временной изменчивости отклик уровня моря, осредненного по Северному Ледовитому океану, находится в противофазе с индексом арктической осцилляции. На основе метода множественной регрессии получены количественные оценки зависимости уровня моря и компонент геострофической скорости от величины индекса арктической осцилляции. Перепад уровня между шельфом и более глубоководной частью океана составил ~ 4 см на 1 единицу индекса арктической осцилляции. Разница между областями положительных и отрицательных значений аномалий уровня моря создает градиент давления, что приводит к увеличению аномалий поверхностных геострофических скоростей и усиливает поступление атлантических вод вдоль кромки шельфа в восточном направлении при циклоническом режиме (индекс арктической осцилляции больше нуля). При антициклоническом режиме циркуляции атмосферы (индекс меньше нуля) эффект становится противоположным. С этим согласуются оценки коэффициентов линейной регрессии для аномалий скорости геострофических течений, которые составили ~ 0.5 см/с на 1 единицу индекса. На основании полученных результатов предложена концептуальная схема режимов циркуляции и распространения распресненных вод в зависимости от фазы арктической осцилляции.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, альтиметрия, стерический уровень, арктическая осцилляция, режимы циркуляции океана, *GRACE*

© Лемешко Е. Е., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90061.

Для цитирования: Лемешко Е. Е. Межгодовая изменчивость режимов циркуляции вод Северного Ледовитого океана // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 48–64. EDN TYGZLF. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-48-64

Interannual Variability of Water Circulation Regimes in the Arctic Ocean

E. E. Lemeshko

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia
e-mail: e.lemeshko@mhi-ras.ru*

Abstract

The article studies the interannual variability of the Arctic Ocean water circulation regimes according to altimetry data for the area from 65°N to 89.75°N including the ice-covered area of the ocean. The purpose of the work is to study the variability of the ocean level and the velocities of surface geostrophic currents depending on the value of the Arctic oscillation index, and to establish quantitative patterns between them. In addition, the paper considers the influence of different ocean circulation regimes and the value of the Arctic oscillation index on the steric level variability as an indicator of freshening/salinization processes in the polar region north of 81.5°N. The steric component of level was calculated as the difference between the dynamic topography from altimetry data and the GRACE data of the manometric level component. On an interannual time scale, the sea level response averaged over the Arctic Ocean is in antiphase with the Arctic Oscillation Index. Based on the method of multiple regression, quantitative estimates of the dependence of the sea level and geostrophic velocity components on the value of the Arctic oscillation index were obtained. The level difference between the shelf and the deeper part of the ocean was ~ 4 cm per unit of the Arctic oscillation index. The difference between the areas of positive and negative values of the sea level anomalies creates a pressure gradient, which leads to an increase in the anomalies of surface geostrophic velocities and enhances the inflow of Atlantic waters along the shelf edge in an easterly direction during the cyclonic regime (Arctic Oscillation Index is greater than 0). Under the anticyclonic regime of atmospheric circulation (the index is less than 0), the effect becomes opposite. This agrees with the estimates of the linear regression coefficients for the velocity anomalies of geostrophic currents, which amounted to ~ 0.5 cm/s per 1 index unit. On the basis of the obtained results, a conceptual scheme of the regimes of circulation and distribution of desalinated waters depending on the phase of the Arctic oscillation is proposed.

Keywords: Arctic Ocean, altimetry, steric level, arctic oscillation, ocean circulation regimes, altimetry, GRACE

Acknowledgements: The work was funded by the RFBR under research project no. 20-35-90061.

For citation: Lemeshko, E.E., 2023. Interannual Variability of Water Circulation Regimes in the Arctic Ocean. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 48–64. EDN TYGZLF. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-48-64

Введение

Приповерхностная циркуляция Северного Ледовитого океана (СЛО) в основном характеризуется чередованием антициклонической и циклонической фаз на межгодовых масштабах изменчивости [1–3]. Такое описание циркуляции основывалось на анализе динамической топографии, рассчитанной по данным гидрологических наблюдений, и численном моделировании [1–3]. По данным современных экспедиционных исследований, наиболее резкие изменения в СЛО произошли в 2010-е гг. [1].

Район вокруг Северного полюса (СП) севернее 81.5° с. ш., иногда называемый «слепым» пятном (область СП на рис. 1) из-за отсутствия там данных альтиметрии до 2011 г., важен для понимания гидрофизических изменений в СЛО. Морской лед и распресненные поверхностные воды выносятся Трансарктическим течением (ТТ) через данный регион в сторону Северной Атлантики и во многом определяют термохалинную структуру ее приполярных областей. Поэтому такие параметры, как толщина льда, придонное давление и стерический уровень (отражающий вертикальную гидрологическую структуру вод), являются ключевыми индикаторами изменчивости всего СЛО.

Независимые оценки пресноводного баланса на основе анализа гидрологических данных показали две независимые тенденции в изменчивости пресноводного баланса СЛО [4]. С одной стороны, наблюдалось распреснение в Канадском бассейне со скоростью изменения толщины слоя распресненных вод 2.04 ± 0.64 м/10 лет, а с другой стороны – осолонение в Восточно-Евразийском бассейне с трендом 0.96 ± 0.86 м/10 лет [4]. По данным многолетних гидрологических наблюдений, распреснение отмечалось также в районе Северного полюса с трендом 1.19 ± 0.02 м/10 лет [4].

В результате анализа комплексных данных экспедиционных исследований в районе круговорота Бофорта сделан вывод об увеличении запаса пресных вод с 2003 по 2018 г. на 40 % относительно среднемноголетнего значения за 1970–2000 гг. В качестве основного механизма распреснения рассматривалась аккумуляция пресных вод вследствие воздействия антициклонической атмосферной циркуляции [5].

На основании результатов анализа уровня моря по данным альтиметрии для района круговорота Бофорта и Северного моря были выделены противоположные тенденции в трендах уровня в 2009–2011 гг. [6]. В итоге сделан вывод, что сдвиг в изменчивости уровня моря в этих районах был обусловлен изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции, связанной с индексом арктической осцилляции (АО) [5, 6].

Арктическая осцилляция (АО) – климатический индекс, который характеризует распределение атмосферного давления и особенности поля ветра над Арктикой. Когда большая часть Арктики занята циклоном, индекс АО положительный, отрицательным он становится во время антициклонической циркуляции атмосферы. Во время положительной фазы индекса АО происходит усиление притока теплых Атлантических вод и ослабление распространения Тихоокеанских вод. Кроме того, увеличивается транспорт морского льда и приповерхностных распресненных вод в Атлантику, меняются пути распространения стока Евразийских рек. Во время отрицательной фазы индекса АО над Арктикой располагается антициклоническая область давления,

и знак аномалии расхода течений меняется на противоположный [2]. Циклоническая мода циркуляции океана запаздывает относительно индекса АО примерно на 1 год [7–9].

Статья посвящена исследованию изменчивости уровня океана и скоростей поверхностных геострофических течений в зависимости от величины индекса АО, а также установлению количественных закономерностей между ними. Дополнительно рассмотрено влияние различных режимов циркуляции океана и величины индекса АО на изменчивость стерического уровня как индикатора процессов распреснения/осолонения в районе круговорота Бофорта и в полярной области севернее 81.5° с. ш. Реконструированная стерическая компонента уровня рассчитывалась как разница между динамической топографией по данным альтиметрии и данными *GRACE* о манометрической компоненте уровня. Затем реконструированный стерический уровень осреднялся по области круговорота Бофорта и по «слепой» полярной области севернее 81.5° с. ш., до 2011 г. недоступной для спутниковой альтиметрии (рис. 1).

Данные и методы

После 2011 г. на высокие орбиты были запущены новые спутники *Envisat* и *CryoSat-2*, что позволило получать данные альтиметрии в области «слепого» пятна вплоть до 89.75° с. ш. и повысить точность измерений аномалий уровня моря [9].

Были проведены методические работы по сравнению данных альтиметрии с измерениями уровня моря с помощью береговых мареографов. Результаты показали достаточно высокую степень корреляции между ними для периодов открытой воды: в Норвежском море значения в среднем составили 0.86 [9, 10], а в Баренцевом – 0.89 [2].

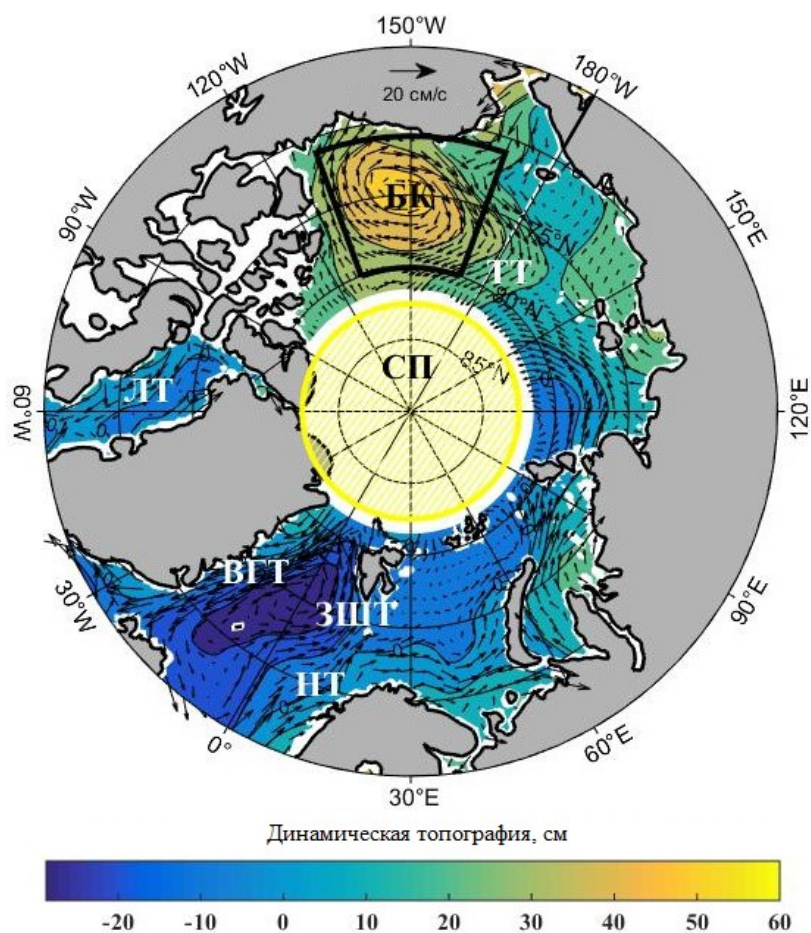
Полученные новые данные альтиметрии использовались для оценки динамической топографии всего СЛО, включая область севернее 81.5° с. ш. согласно следующей формуле:

$$H_{DT} = H_{SSH} - H_G, \quad (1)$$

где H_{DT} – динамическая топография океана; H_{SSH} – высота морской поверхности; H_G – высота поверхности геоида [9, 10]. Поверхностные геострофические скорости рассчитывались по значениям динамической топографии H_{DT} , полученным по формуле (1) [10, 11].

В статье использовались два массива данных спутниковой альтиметрии в виде среднемесячных данных динамической топографии океана и поверхностных геострофических скоростей, предоставленные центром *Centre for Polar Observation and Modelling, University College London* (URL: www.crom.ucl.ac.uk/dynamic_topography). Первый массив состоит из данных за 2003–2014 гг. с покрытием от 65° до 81.5° с. ш. на сетке $0.75^\circ \times 0.25^\circ$ [11], а второй массив – из данных за 2011–2020 гг. с более высоким разрешением (20×20 км) на сетке в полярной стереографической проекции с покрытием от 65° до 89.75° с. ш. Оба массива включают данные для районов океана, покрытых льдом, описание методики расчета уровня моря приводится в [10].

Кроме того, использовались данные гравиметрии (*Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE)*) в версии *RL06*, сетка $1^\circ \times 1^\circ$, среднемесячные, 2002–2017 гг., и *GRACE-FO* 2018–2021 гг. с покрытием всего океана до 89.9° с. ш. (URL: <https://podaac.jpl.nasa.gov/datasetlist?search=tellus>).



Р и с . 1 . Схема поверхностных течений Северного Ледовитого океана: динамическая топография и геострофические течения, осредненные по данным альтиметрии за 2003–2014 гг.: СП – «слепое пятно» (регион севернее 81.5° с. ш.); НТ – Норвежское течение; ЛТ – Лабрадорское течение; ЗШТ – Западно-Шпицбергенское течение; ВГТ – Восточно-Гренландское течение; ТТ – Трансарктическое течение; БК – Бофорта круговорот

Fig. 1. Scheme of the surface currents of the Arctic Ocean: dynamic topography and geostrophic currents averaged from altimetry data for 2003–2014. BS – “blind spot” – the region north of 81.5° N; NwC – Norwegian Current; LT – Labrador Current; WSC – West Spitsbergen Current; EGC – East Greenland Current; TPD – Transpolar Drift; BG – Beaufort Gyre.

Результаты

Для СЛО были рассчитаны средние значения динамической топографии и поверхностных геострофических скоростей за 2003–2014 гг. (рис. 1). На рис. 1 белыми символами выделены основные течения и крупномасштабные элементы циркуляции океана: Норвежское, Лабрадорское, Западно-Шпицбергенское, Восточно-Гренландское, Трансарктическое течения и круговорот

Бофорта (рис. 1), которые соответствуют известной картине течений¹⁾ и полученным для этих районов оценкам геострофических скоростей по более ранним альтиметрическим продуктам [10].

Средние значения скоростей течений, рассчитанных нами за период 2003–2014 гг., составляют ~ 10 и ~ 15 см/с в районе западнее Шпицбергена и у Новой Земли соответственно, перепад уровня между шельфом и глубоководной частью бассейна достигает 30 см (рис. 1).

Кроме того, при сопоставлении с данными измерителей скоростей течений на десяти автономных буйковых станциях за 2011–2018 гг. значение корреляции для моря Лаптевых и моря Бофорта составило 0.7, а для пролива Фрама оно было равным 0.34. При этом среднеквадратичные отклонения (СКО) между модулями геострофических скоростей течений по данным альтиметрии и контактных измерений на автономных буйковых станциях составили 1–2 см/с, а СКО разницы значений по углу – около 60° за 2005–2008 гг. [10].

Для анализа межгодовой изменчивости уровня моря внутрисезонные колебания удаляли с помощью фильтра скользящего среднего с шириной окна 12 месяцев, затем были сформированы ряды аномалий уровня моря как отклонения от их среднееголетних значений. На рис. 2 приведены полученные аномалии уровня моря, осредненные по всему СЛО.

Оба массива альтиметрии достаточно хорошо согласуются между собой на интервале перекрытия данных 2011–2014 гг. (рис. 2).

Антициклонические режимы в СЛО, выделяемые по положительным значениям аномалий уровня моря, наблюдались в 2006–2007 гг., 2009–2013 гг. и 2016–2017 гг. (рис. 2).

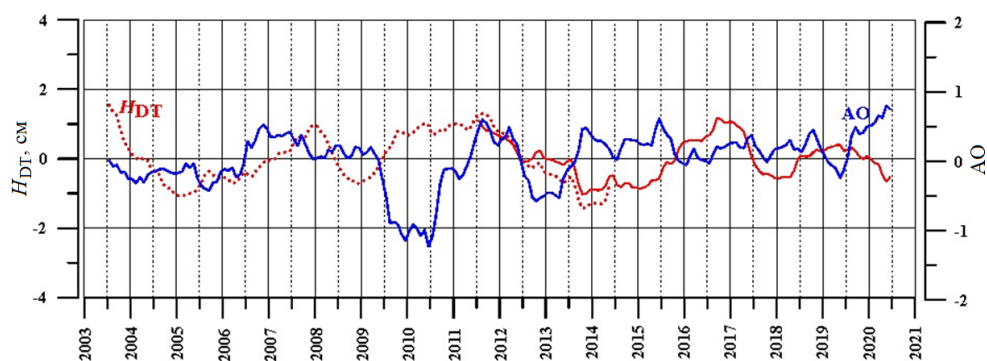


Рис. 2. Графики осредненной по СЛО динамической топографии (см) по данным альтиметрии (H_{DT}) за 2003–2014 гг. (красная штриховая линия), за 2011–2020 гг. (красная сплошная линия) и индекс АО (синяя линия) после фильтрации скользящим средним с шириной окна 12 месяцев

Fig. 2. Plots of dynamic topography averaged over the Arctic Ocean (cm) according to altimetry data (H_{DT}) for the period 2003–2014 (red dashed line), for the period 2011–2020 (red solid line) and the Arctic Oscillation (AO) Index (blue line) after filtering by a moving average with a window width of 12 months

¹⁾ Атлас Арктики / Ред. А. Ф. Трешников. Москва : Главное управление геодезии и картографии, 1985. 204 с.

Циклонические же режимы (отрицательные аномалии уровня) наблюдались в 2005, 2008, 2014 гг. (рис. 2). За весь период альтиметрических наблюдений 2003–2020 гг. максимальная длительность антициклонического режима океана составила ~ 3.5 года – в 2009–2013 гг., и этому соответствовала отрицательная фаза индекса АО (рис. 2). И наоборот, во время положительной фазы индекса АО (2013–2016 гг.), когда в поле приземного атмосферного давления выделяется циклонический режим, наблюдаются отрицательные значения аномалий уровня моря с максимальной длительностью ~ 2.5 года (рис. 2).

В статье использовались данные индекса АО, предоставленные *NOAA/NWS Climate Prediction Center* (США)²⁾. Выделяются длительные периоды отрицательной фазы индекса АО в 2003–2006 гг., 2009–2011 гг., 2012–2013 гг. и 2016–2017 гг., которым соответствует антициклоническая циркуляция в СЛО: средние по акватории значения динамической топографии положительны (рис. 2). Для положительной фазы индекса АО наблюдаются отрицательные значения средней по СЛО динамической топографии, наиболее выражено это проявляется в 2013–2016 гг. (рис. 2). В период преобладания циклонического режима в атмосфере во время положительной фазы АО циклоническая циркуляция океана проявлялась в понижении среднего уровня моря с временной задержкой около 1 года относительно фазы индекса АО (рис. 2).

Уровень моря H состоит из суммы стерической компоненты уровня H_{Sth} , обусловленной изменениями плотности морской воды, и манометрической компоненты уровня $H_{\text{ман}}$, обусловленной вариациями водной массы столба жидкости, при этом их характерные временные масштабы изменчивости разные [12, 13]:

$$H = H_{\text{Sth}} + H_{\text{ман}}. \quad (2)$$

Изменчивость манометрического уровня в Норвежском и Баренцевом морях имеет в основном внутрисезонный характер, и ее вклад достигает 80 % от общей дисперсии. Следовательно, баротропный отклик уровня моря на ветровое воздействие имеет масштаб нескольких месяцев и может маскироваться более долговременной изменчивостью стерического уровня. В статьях [12, 13] на основе анализа данных *GRACE* и численного моделирования было получено, что на внутрисезонных масштабах вариации манометрического уровня моря имели высокую корреляцию с аномалиями поля ветра для рассматриваемого сектора.

Чтобы проанализировать межгодовую изменчивость данных динамической топографии и поверхностных геострофических скоростей, в каждом узле сетки из данных после фильтрации скользящим средним с шириной окна 12 месяцев устранялся линейный тренд. Полученные аномалии уровня океана осреднялись по периодам положительной ($AO > 0$) и отрицательной ($AO < 0$) фаз индекса АО [14]. Сначала такой подход был опробован для сектора оке-

²⁾ URL: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml
(дата обращения: 30.08.2022).

ана (65° – 81.5° с. ш., 0° – 70° в. д.), объединяющего Северное, Норвежское и Баренцево моря за 2003–2014 гг. [9]. В периоды, когда индекс АО находится в положительной фазе, центральную часть СЛО занимает циклоническая область с отрицательными значениями аномалий уровня до -3 см, нулевая изолиния уровня примерно соответствует изобате 300 м. В южной части Баренцева моря и в Карском море выделяются положительные аномалии уровня до 3 см, векторы аномалий скоростей (~ 1 см/с) соответствуют циклоническому режиму циркуляции. Для периодов, когда индекс АО находился в отрицательной фазе, аномалии уровня океана и скоростей соответствовали антициклоническому режиму циркуляции. Аналогично для всей акватории СЛО за 2011–2020 гг. были выделены циклонический режим циркуляции океана во время положительной фазы индекса $AO > 0$ и антициклонический режим циркуляции во время отрицательной фазы индекса $AO < 0$.

Для количественного оценивания влияния индекса АО на изменчивость аномалий уровня моря H_{DT} и поверхностных геострофических скоростей U , V использовался линейный регрессионный анализ [15]:

$$\begin{aligned} H_{DT}^i &= \alpha_{DT}^i \cdot AO + \varepsilon_{DT}^i, \\ U^i &= \alpha_U^i \cdot AO + \varepsilon_U^i, \\ V^i &= \alpha_V^i \cdot AO + \varepsilon_V^i, \end{aligned} \quad (3)$$

где коэффициенты регрессии для уровня α_{DT}^i , см, и компонент скоростей α_U^i , α_V^i , см/с, оценивались в каждом i -м узле сетки, а ε_{DT}^i , ε_U^i , ε_V^i представляют собой некоррелированный белый шум. На рис. 3 приведены коэффициенты регрессии уровня моря в виде изолиний и соответствующие коэффициенты модуля скорости течений в виде векторов α_{modV}^i :

$$\alpha_{modV}^i = [(\alpha_U^i)^2 + (\alpha_V^i)^2]^{1/2}. \quad (4)$$

Пространственное распределение коэффициентов линейной регрессии уровня моря и поверхностных геострофических скоростей соответствует циклоническому режиму циркуляции в СЛО при положительных значениях индекса АО согласно выражению (3) (рис. 3) и, таким образом, согласуется с распределением уровня моря и скоростей, осредненных для положительной фазы индекса АО. Аналогично для отрицательной фазы индекса АО распределение коэффициентов линейной регрессии уровня моря и поверхностных скоростей меняет знак на минус согласно (3), что дает антициклоническую картину циркуляции и согласуется с картой значений уровня моря и скоростей течений, осредненных за периоды отрицательной фазы индекса АО. Для повышения робастности регрессионных оценок линейный тренд устранялся из данных индекса АО, динамической топографии и скоростей после фильтрации скользящим средним с шириной окна 12 месяцев. Полученные таким образом аномалии обрабатывались по формуле регрессии (3), результаты приведены на рис. 3, 4.

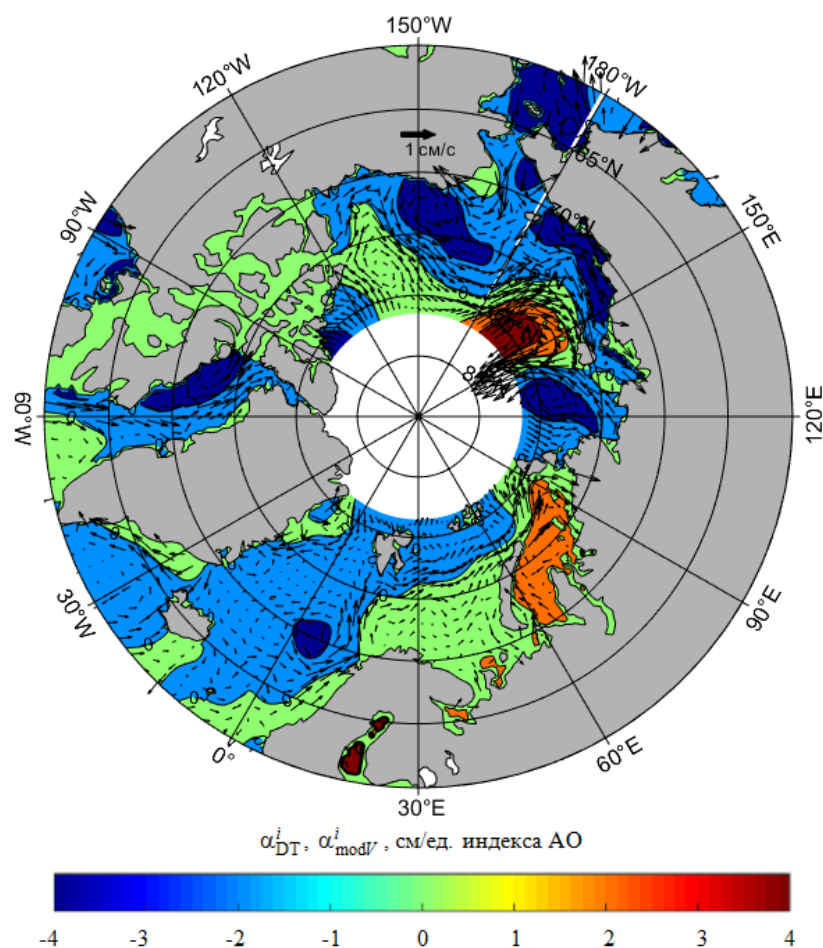


Рис. 3. Пространственное распределение коэффициентов линейной регрессии для аномалий уровня моря α_{DT}^i (см/ед. индекса АО) и для аномалий скорости течений α_{modV}^i ((см/с)/ед. индекса АО) в виде векторов за 2003–2014 гг.

Fig. 3. Spatial distribution of linear regression coefficients for sea level anomalies α_{DT}^i (cm/AO index unit) and for current velocity anomalies ((cm/s)/AO index unit) as vectors for 2003–2014

В результате нами получены регрессионные соотношения для уровня моря и компонент геострофических скоростей в зависимости от величины индекса АО. Рассчитанные коэффициенты линейной регрессии α_{DT}^i для аномалий уровня моря составляют более ~ 2 см в шельфовой зоне и около -2 см в глубоководной части океана (рис. 3).

Для Норвежского моря, северной части Баренцева и Карского морей, для шельфа моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря коэффициенты линейной регрессии модуля аномалий скорости течений α_{modV}^i имеют значения ~ 0.5 см/с на 1 единицу индекса АО для данных альтиметрии за 2003–2014 гг. и $0.6 \div 0.8$ см/с на 1 единицу индекса АО для данных за 2011–2020 гг. (рис. 3).

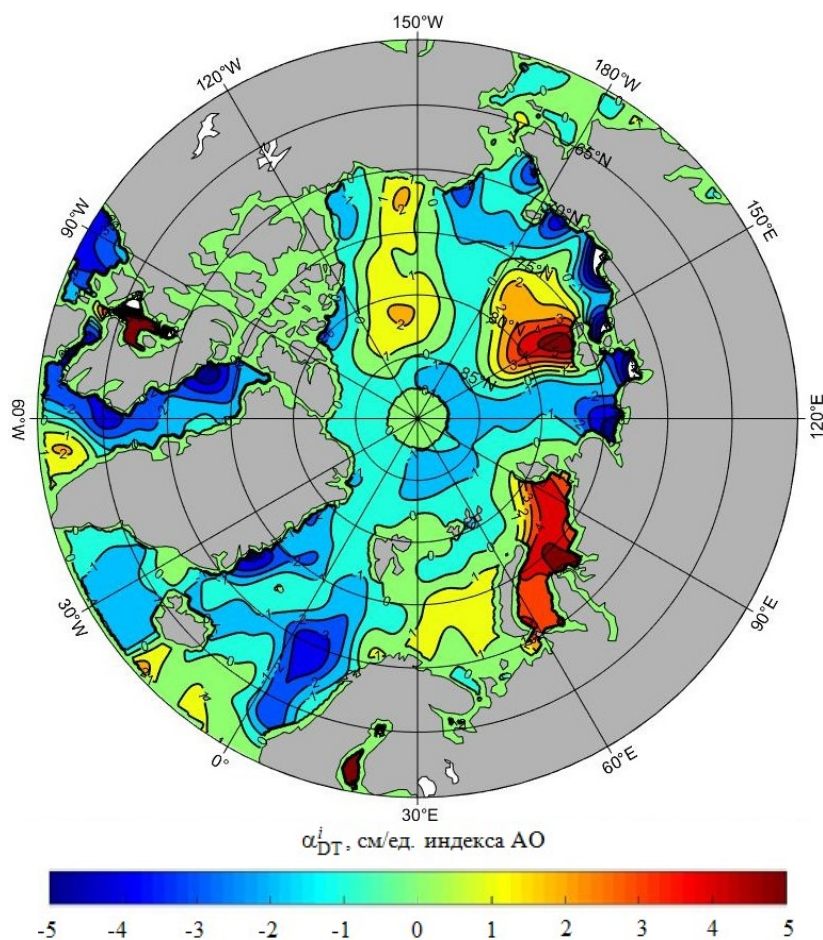


Рис. 4. Пространственное распределение коэффициентов линейной регрессии для аномалий уровня моря α_{DT}^i (см/ед. индекса АО) за 2011–2020 гг.

Fig. 4. Spatial distribution of linear regression coefficients for sea level anomalies (cm/AO index unit) for 2011–2020

Для «слепого» пятна 81.5° – 89° с. ш. в секторе 30° – 80° в. д. и 130° – 180° в. д. также отмечаются высокие значения коэффициентов (0.6 – 0.8 см/с на 1 единицу индекса АО), а в секторе 120° з. д. – 30° в. д. наоборот низкие значения (0.1 – 0.2 см/с на 1 единицу индекса АО) (рис. 4).

Перепад уровня моря между шельфом и более глубоководной частью составляет ~ 4 см на 1 единицу индекса АО (рис. 4). Этот перепад усиливается в Карском море до ~ 5 см, а в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море – до ~ 8 см на 1 единицу индекса АО в секторе 150 – 180° в. д. (рис. 4).

Усиление градиентов уровня моря приводит к усилению градиентов давления между шельфом и более глубоководной частью океана и, как следствие, к увеличению геострофических скоростей до ~ 1.5 см/с на 1 единицу индекса АО (рис. 4). Следовательно, во время положительной фазы АО происходит

увеличение транспорта пресных вод от шельфа моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря в центральную часть океана.

Таким образом, во время положительной фазы индекса АО, когда центральная часть Арктики занята циклоном, наблюдается рост величины аномалий скоростей течений, что способствует притоку теплых атлантических вод в Баренцево море и центральную часть океана, а также отмечается уменьшение притока вод через Берингов пролив. Во время отрицательной фазы АО, когда над Арктикой находится антициклоническая область давления, знаки аномалии скоростей течений меняются на противоположные, что уменьшает приток теплых атлантических вод в СЛО и увеличивает поступление тихоокеанских вод через Берингов пролив.

Данные альтиметрии и *GRACE* использовались для оценки манометрической компоненты уровня СЛО. Манометрический уровень $H_{\text{ман}}$ обусловлен вариациями массы водного столба. Уровень океана H определяется по данным альтиметрии. Таким образом, реконструированная стерическая компонента уровня моря H_{Stb} равна уровню моря H минус манометрическая компонента уровня. С использованием соотношения (2) были реконструированы поля стерического уровня по данным альтиметрии и *GRACE*. Реконструированный стерический уровень сравнивался со стерическим уровнем, рассчитанным по гидрологическим данным (*Unified Database for Arctic and Subarctic Hydrography, UDASH*, URL: <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.872931>). В работах [4, 5] показано, что в стерическом уровне СЛО преобладает вклад халостерической компоненты над термостерической. Таким образом, изменчивость стерического уровня СЛО является индикатором распреснения верхнего слоя океана [4]. Методика расчета стерического уровня по данным альтиметрии и *GRACE* и его валидации описана в [9]. Данные альтиметрии за 2011–2020 гг. в полярной области севернее 81.5° с. ш. позволили получить оценки стерического уровня для области «слепого» пятна (рис. 2). На рис. 5 приведен реконструированный стерический уровень, осредненный по этой области.

Стерический уровень в области «слепого» пятна может рассматриваться как индикатор процесса распреснения/осолонения, так как основной вклад в стерический уровень вносит его халостерическая компонента в приполярных областях океана. Тренд стерического уровня в этой области положительный и составляет 0.3–0.4 см/год (рис. 5), что является индикатором увеличения запаса пресных вод за 2011–2020 гг.

Реконструированный стерический уровень испытывает значительные межгодовые колебания и достигает максимумов в период отрицательной фазы АО, например в 2012–2013 гг. и 2015–2017 гг., что является индикатором увеличения распреснения водных масс (рис. 5). Соответственно, в периоды положительной фазы АО в 2010–2012 гг. и 2014–2015 гг. наблюдались минимумы стерического уровня, что свидетельствует об увеличении солености в эти периоды (рис. 5). Следует отметить особенность изменчивости стерического уровня во время отрицательной фазы АО в 2018–2020 гг. – амплитуда колебаний упала в 3–4 раза при сохранении положительного тренда. Полученный вывод подтверждается сопоставлением содержания распресненных вод в полярной области, рассчитанной по данным гидрологических съемок [4, 5]. Так, тренд содержания пресных вод в верхнем 100-метровом слое за 1994–2008 гг. составил

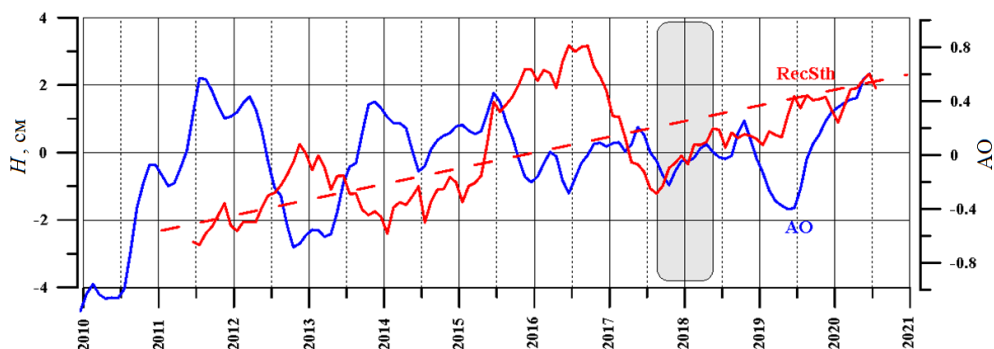


Рис. 5. Графики осредненного по области «слепого» пятна (рис. 1) реконструированного стерического уровня (см) за 2011–2020 гг. (красная сплошная линия), его тренда (красная штриховая линия) и индекса АО (синяя линия) после фильтрации скользящим средним с шириной окна 12 месяцев. Данные *GRACE* за 07.2017–05.2018 проинтерполированы (серая область)

Fig. 5. Plots of the reconstructed steric level (cm) averaged over the area of the “blind” spot (Fig. 1) for 2011–2020 (red solid line), trend (red dashed line), and the AO Index (blue line) after being filtered by a moving average with a window width of 12 months. GRACE data for 07.2017–05.2018 were interpolated (grey area)

11.19 см/год [4]. Пересчет в величину стерического уровня производился при использовании константы 35.5 [5], что дает значение тренда стерического уровня 0.34 см/год и соответствует полученному нами значению тренда реконструированного стерического уровня 0.3–0.4 см/год.

Аналогично для области круговорота Бофорта (рис. 1) получили положительный тренд реконструированного стерического уровня (рис. 6). Значение тренда реконструированного по данным альтиметрии и *GRACE* стерического уровня составило 0.45 см/год, а пересчет тренда содержания пресных вод в верхнем 100-метровом слое круговорота Бофорта по гидрологическим данным за 1994–2008 гг. дает 0.57 см/год, что согласуется с нашей оценкой с учетом погрешности определения тренда содержания пресных вод [4]. Интересно отметить, что накопление пресных вод во время положительной фазы АО наблюдалось в круговороте Бофорта в 2010–2013 гг., а в 2013–2015 гг., наоборот, наблюдалось уменьшение стерического уровня, обусловленное выносом распресненных вод из круговорота Бофорта. После 2015 г. накопление пресных вод происходило уже во время отрицательной фазы АО, что привело к росту стерического уровня (рис. 6).

Анализ изменчивости атмосферной циркуляции, идентифицируемой по фазам индекса АО, пространственно-временной изменчивости динамической топографии и реконструированного стерического уровня позволяет предложить концептуальную схему циркуляции СЛО, которая дана на рис. 7. Во время отрицательной фазы АО высокое приземное давление над Арктикой вызывает антициклоническую циркуляцию над большей частью СЛО (рис. 7, а). Распресненные воды от стока Евразийских рек распространяются через Евразийский бассейн и выносятся из СЛО в области Трансарктического

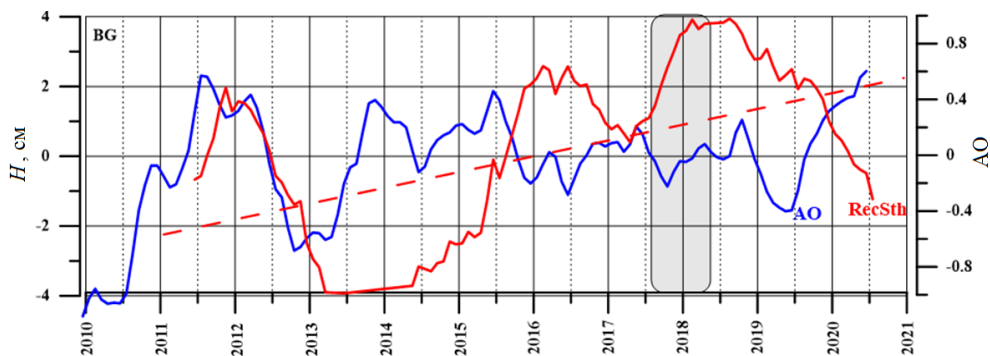


Рис. 6. Графики осредненного по области круговорота Бофорта (рис. 1) реконструированного стерического уровня (см) за 2011–2020 гг. (красная сплошная линия), его тренда (красная штриховая линия) и индекса АО после фильтрации скользящим средним с шириной окна 12 месяцев. Данные GRACE за 07.2017–05.2018 проинтерполированы (серая область)

Fig. 6. Plots of the Beaufort gyre area-averaged (Fig. 1) reconstructed steric level (cm) for 2011–2020 (red solid line), its trend (red dashed line) and AO Index after filtering by a moving average with a window width of 12 months. GRACE data for 07.2017–05.2018 were interpolated (grey area)

течения (рис.1), что показано на рис.7, а синими стрелками. Результаты анализа изменчивости реконструированного стерического уровня, осредненного по области «слепого» пятна (рис. 1) показали, что он достигает максимумов в период отрицательной фазы АО, например в 2012–2013 гг. и 2015–2017 гг., что является индикатором увеличения распреснения водных масс (рис. 5) и согласуется со схемой на рис. 7, а. С другой стороны, для области круговорота Бофорта наблюдалось накопление пресных вод и во время отрицательной фазы АО после 2015 г. (рис. 6), что обусловлено конвергенцией экмановского переноса распресненных вод на шельфе и показано зелеными стрелками на рис. 7, а для круговорота Бофорта, которому соответствуют положительные значения динамической топографии по данным альтиметрии (рис.1).

Во время положительной фазы АО низкое приземное давление над Арктикой вызывает циклоническую циркуляцию в Евразийском бассейне СЛО (рис. 7, b). Распресненные воды от стока Евразийских рек распространяются вдоль арктического шельфа России геострофическими течениями и вторичной циркуляцией океана и захватываются круговоротом Бофорта, что показано на рис. 7, b синими и фиолетовыми стрелками. Результаты анализа изменчивости реконструированного стерического уровня, осредненного по области «слепого» пятна показали, что во время положительной фазы АО в 2010–2012 гг. и 2014–2015 гг. наблюдались минимумы стерического уровня, что свидетельствует об увеличении солёности в эти периоды (рис. 5) и согласуется со схемой циркуляции на рис. 7, b. Для области круговорота Бофорта наблюдалось накопление пресных вод во время положительной фазы АО только в 2011–2013 гг., а в 2013–2015 гг., наоборот, наблюдалось уменьшение стерического уровня (рис. 6). Тем не менее за весь период 2011–2020 гг. в круговороте Бофорта увеличивалось накопление пресных вод, поскольку

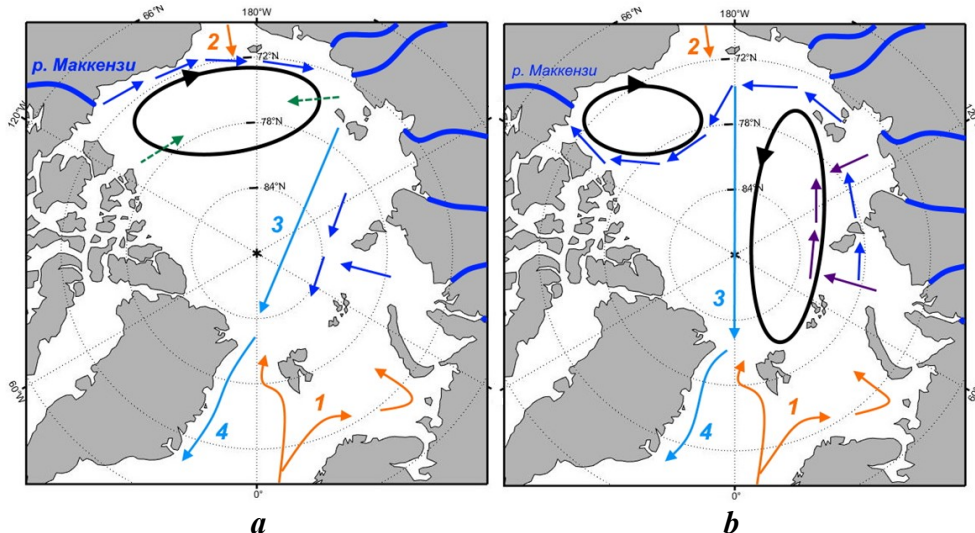


Рис. 7. Концептуальная схема циркуляции СЛО: *a* – во время отрицательной фазы АО (антициклонической, $AO < 0$); *b* – во время положительной фазы АО (циклонической, $AO > 0$). Черные стрелки обозначают поверхностную геострофическую циркуляцию, оранжевые – поступление атлантических (1) и тихоокеанских вод (2); голубые – Трансарктическое (3) и Восточно-Гренландское течение (4). Синие и фиолетовые стрелки показывают распространение пресных вод от реки Маккензи и стока евразийских рек. Зеленые стрелки – экмановский перенос распресненных вод. Жирными синими линиями обозначены впадающие в СЛО реки

Fig. 7. Conceptual scheme of the Arctic Ocean circulation: (a) during the negative AO phase (anticyclonic, $AO < 0$); b) during the positive AO phase (cyclonic, $AO > 0$). The black arrows indicate surface geostrophic circulation, the orange arrows indicate the inflow of Atlantic (1) and Pacific waters (2); the light blue arrows – Transpolar Drift (3) and East Greenland Current (4). The dark blue and purple arrows show the distribution of fresh water from the Mackenzie River and from the Eurasian Rivers. Green arrows show Ekman transfer of fresh water. The bold dark blue lines are for the rivers flowing into the Arctic Ocean

тренд стерического уровня был положительным (0.45 см/год), что также подтверждается положительным трендом содержания пресных вод в верхнем 100-метровом слое круговорота Бофорта по гидрологическим данным за 1994–2008 гг. [4, 5].

В итоге предлагаемая концептуальная схема на рис. 7 интегрирует полученные результаты анализа динамической топографии, поверхностных геострофических течений по данным альтиметрии и реконструированного стерического уровня и индекса АО в контексте влияния режимов циркуляции атмосферы на пути распространения распресненных вод в СЛО.

Выводы

Изменение уровня СЛО является важным индикатором изменчивости климата Арктики и в целом климатической системы Земли в силу интегрального характера формирования уровня моря. Для Арктики в последнее десятилетие достигнут прогресс в обработке альтиметрической информации

и повышения ее точности, а запуск спутников *Envisat* и *CryoSat-2* позволил увеличить площадь покрытия в высоких широтах до 89.75° с. ш. Поэтому использование новых данных альтиметрии как для районов СЛО, покрытых льдом, так и для открытой акватории, позволило получить оценки динамической топографии и поверхностных геострофических скоростей, включая область «слепого» пятна севернее 81.5° с. ш., данные альтиметрии для которой до 2011 г. отсутствовали. С использованием гравиметрических данных *GRACE* удалось получить оценки изменчивости манометрической и стерической компонент уровня океана. Эти оценки хорошо согласуются с расчетами по имеющимся инструментальным наблюдениям. Влияние режимов атмосферной циркуляции на пространственно-временную изменчивость уровня океана и поверхностных течений изучалось на основе анализа индекса АО.

На основании полученных результатов предложена концептуальная схема режимов циркуляции и распространения распресненных вод в зависимости от фазы АО. Схема согласуется с межгодовой изменчивостью реконструированной стерической компоненты уровня для полярной области океана за 2011–2020 гг.

В итоге основные результаты можно сформулировать следующим образом.

1. Уточнена пространственно-временная изменчивость стерической и манометрической компонент уровня моря, получены оценки их трендов по данным альтиметрии, *GRACE* и архивным гидрологическим данным. Получены оценки изменчивости стерического уровня для районов СЛО, где обеспеченность гидрологических измерений низка или почти отсутствует, в том числе и для «слепого» пятна альтиметрии севернее 81.5° с. ш. после 2011 г.

2. Описаны особенности отклика уровня моря и поверхностных геострофических течений СЛО на циклоническую/антициклоническую циркуляцию атмосферы, описываемую с помощью индекса АО.

3. Получены количественные оценки зависимости межгодовой изменчивости аномалий уровня моря и поверхностных геострофических течений на основе регрессионных соотношений в зависимости от величины индекса АО: перепад уровня между шельфом и более глубоководной частью составляет ~ 4 см на 1 единицу индекса АО, для аномалий скорости течений ~ 0.6 – 0.8 см/с на 1 единицу индекса АО за 2003–2014 гг. Этот перепад усиливается в Карском море до ~ 5 см и до ~ 8 см на 1 единицу индекса АО в секторе 150 – 180° в. д. (в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море) в 2011–2020 гг. Усиление градиентов уровня приводит к усилению градиентов давления между шельфом и более глубоководной частью океана и, как следствие, к увеличению геострофических скоростей до ~ 1.5 см/с на 1 единицу индекса АО.

Таким образом, во время положительной фазы индекса АО, когда центральная часть Арктики занята циклоном, наблюдается увеличение аномалий скоростей течений, что способствует притоку теплых атлантических вод. Во время отрицательной фазы АО аномалии скоростей течений меняются на противоположные.

4. Впервые получены оценки трендов и межгодовой изменчивости стерической компоненты уровня для области «слепого» пятна севернее 81.5° с. ш. на основе реконструкции по данным альтиметрии и *GRACE*.

5. Согласно полученным количественным закономерностям во время отрицательной фазы АО происходит увеличение транспорта пресных вод от шельфа моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря в центральную часть океана. Это подтверждается межгодовой изменчивостью реконструированной стерической компоненты уровня, осредненной по области «слепого» пятна севернее 81.5° с. ш. Как показано, для СЛО стерический уровень является индикатором увеличения распреснения/осолонения водных масс. Соответственно, в периоды положительной фазы АО наблюдаются минимумы стерического уровня, что свидетельствует об увеличении солености в эти периоды времени.

6. На основании полученных результатов предложена концептуальная схема режимов циркуляции и распространения распресненных вод в зависимости от фазы арктической осцилляции. Схема согласуется с режимами циркуляции океана на основе анализа поверхностных геострофических течений по данным альтиметрии и межгодовой изменчивостью реконструированной стерической компоненты уровня для полярной области океана за 2011–2020 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В. В., Фролов И. Е., Фильчук К. В. Трансформация атлантической воды в северо-восточной части Баренцева моря в зимний сезон // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66, № 3. С. 246–266. doi:10.30758/0555-2648-2020-66-3-246-266
2. Armitage T. W. K., Bacon S., Kwok R. Arctic sea level and surface circulation response to the Arctic oscillation // Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45, iss. 13. P. 6576–6584. doi:10.1029/2018GL078386
3. Proshutinsky A. Y., Johnson M. A. Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1997. Vol. 102, iss. C6. P. 12493–12514. doi:10.1029/97JC00738
4. Pnyushkov A. V., Alekseev G. V., Smirnov A. V. On the interplay between freshwater content and hydrographic conditions in the Arctic Ocean in the 1990s–2010s // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10, iss. 3. 401. doi:10.3390/jmse10030401
5. Analysis of the Beaufort Gyre freshwater content in 2003–2018 / A. Proshutinsky [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. Vol. 124, iss. 12. P. 9658–9689. doi:10.1029/2019JC015281
6. Arctic Sea level budget assessment during the GRACE/Argo time period / R. P. Raj [et al.] // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, iss. 17. 2837. doi:10.3390/rs12172837
7. Arctic circulation regimes / A. Proshutinsky [et al.] // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2015. Vol. 373, iss. 2052. 20140160. doi:10.1098/rsta.2014.0160
8. Белокопытов В. Н. Факторы, снижающие эффективность работы систем оперативных океанографических прогнозов в арктическом бассейне // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 2. С. 21–27. EDN ХТСКVN. doi:10.22449/0233-7584-2017-2-21-27
9. Лемешко Е. Е., Лемешко Е. М., Новицкая В. П. Влияние арктической осцилляции на формирование режимов циркуляции вод в секторе Северного, Норвежского и

- Баренцева морей // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 47–64. EDN ULWWQC. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-47-64
10. Sea surface height anomaly and geostrophic current velocity from altimetry measurements over the Arctic Ocean (2011–2020) / F. Doglioni [et al.] // Earth System Science Data. 2023. Vol. 15, iss. 1. P. 225–263. <https://doi.org/10.5194/essd-15-225-2023>
 11. Arctic Ocean surface geostrophic circulation 2003–2014 / T. W. K. Armitage [et al.] // The Cryosphere. 2017. Vol. 11, iss. 4. P. 1767–1780. doi:10.5194/tc-11-1767-2017
 12. Volkov D. L., Landerer F. W. Nonseasonal fluctuations of the Arctic Ocean mass observed by the GRACE satellites // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2013. Vol. 118, iss. 12. P. 6451–6460. doi:10.1002/2013JC009341
 13. Arctic ocean circulation patterns revealed by GRACE / C. Peralta-Ferriz [et al.] // Journal of Climate. 2014. Vol. 27, iss. 4. P. 1445–1468. doi:10.1175/JCLI-D-13-00013.1
 14. The cyclonic mode of Arctic Ocean circulation / J. Morison [et al.] // Journal of Physical Oceanography. 2021. Vol. 51, iss. 4. P. 1053–1075. doi:10.1175/JPO-D-20-0190.1
 15. Себер Д. А. Ф. Линейный регрессионный анализ. Москва : Мир, 1980. 456 с.

Поступила 16.12.2022 г.; одобрена после рецензирования 21.01.2023 г.; принята к публикации 01.02.2023 г.; опубликована 24.03.2023 г.

Об авторе:

Лемешко Егор Евгеньевич, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **SPIN-код: 7313-4819; ResearcherID: C-5691-2016; Scopus Author ID: 57205681264, e.lemeshko@mhi-ras.ru**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Влияние содержания органического вещества в донных отложениях акваторий Крыма с интенсивным водообменом на накопление цинка, хрома и никеля

Е. Е. Совга, Е. А. Котельянец *

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
** e-mail: plistus@mail.ru*

Аннотация

Проанализированы данные, полученные в ходе экспедиционных исследований в прибрежных акваториях Крыма с интенсивным водообменом: Каламитском (2011, 2012 гг.), Феодосийском (2006 г.) заливах и Керченском проливе (2007, 2008 гг.). Содержание тяжелых металлов (Zn, Ni, Cr) в донных отложениях исследуемых акваторий определяли рентгенофлуоресцентным методом с использованием прибора «Спектроскан МАКС-G». Оценены пространственные неоднородности в распределении Zn, Ni, Cr в донных отложениях Каламитского и Феодосийского заливов, Керченского пролива с учетом содержания органического вещества. Осуществлен сравнительный анализ содержания органического вещества в донных отложениях исследуемых акваторий, которое не только формирует тип осадков, но и определяет их способность к накоплению различных веществ, в том числе макро- и микроэлементов. Показано, что в донных отложениях Феодосийского залива и Керченского пролива повышено содержание органического углерода, цинка и хрома. Выполнен расчет коэффициентов корреляции между содержанием тяжелых металлов и органического углерода как одного из основных осадкообразующих компонентов донных отложений с применением методики построения матриц парных корреляций. Высокий уровень корреляционных связей содержания Zn, Ni, Cr с содержанием органического углерода (0.7–0.8) определен для донных отложений Каламитского залива и Керченского пролива. В донных отложениях Феодосийского залива высокое значение коэффициентов корреляции с содержанием C_{org} (0.9) наблюдается только для Zn. Гидродинамический режим акваторий с интенсивным водообменом (особенно в Керченском проливе) определяет пространственную неоднородность распределения мелкодисперсной фракции донных отложений и связанного с ней органического вещества, что также влияет на особенности поведения исследуемых металлов.

Ключевые слова: Каламитский залив, Феодосийский залив, Керченский пролив, донные отложения, органический углерод, тяжелые металлы

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FNNN-2022-0005 «Прибрежные исследования».

© Совга Е. Е., Котельянец Е. А., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Совга Е. Е., Котельянец Е. А. Влияние содержания органического вещества в донных отложениях акваторий Крыма с интенсивным водообменом на накопление цинка, хрома и никеля // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 65–76. EDN TZBTZD. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-65-76

Influence of Organic Matter Content in Bottom Sediments in Crimean Water Areas with Intensive Water Exchange on Zinc, Chromium, and Nickel Accumulation

Е. Е. Sovga, Е. А. Kotelyanets *

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: plistus@mail.ru*

Abstract

The paper analyzes the data obtained during field studies in water areas with intensive water exchange: Kalamita Bay (2011, 2012), Feodosiya Bay (2006), and the Kerch Strait (2007, 2008). The content of heavy metals (Zn, Ni, Cr) in the bottom sediments of the studied water areas was determined using X-ray fluorescent spectroscan MAKS-G. Spatial heterogeneities in the distribution of Zn, Ni, Cr in the bottom sediments of Kalamita Bay, Feodosiya Bay, and the Kerch Strait were assessed, with the organic matter content taken into account. A comparative analysis was carried out of the organic matter content in the bottom sediments of the studied water areas. The organic matter not only forms the type of sediments, but also determines their ability to accumulate various substances, including macro- and micronutrients. It is shown that the bottom sediments of Feodosiya Bay and the Kerch Strait contain increased levels of organic carbon. Correlation relations between the contents of heavy metals and organic carbon as one of the main sediment-forming components of the bottom sediments were calculated using the method of constructing matrices of pair correlations. A high level of correlations between Zn, Ni, Cr and organic carbon contents (0.7–0.8) was determined in the bottom sediments of Kalamita Bay and the Kerch Strait. In the bottom sediments of Feodosiya Bay, high correlation coefficient with C_{org} content (0.9) was observed only for Zn. The hydrodynamic regime of water areas with intensive water exchange (especially in the Kerch Strait) determines the spatial heterogeneity of the particle size distribution of bottom sediments, especially the fine fraction and the organic matter associated with it, which also affects the behaviour of the studied metals.

Keywords: Kalamita Bay, Feodosiya Bay, Kerch Strait, bottom sediments, organic carbon, heavy metals

Acknowledgements: the work was performed under state assignment no. FNNN-2022-0005 “Coastal studies”.

For citation: Sovga, E.E. and Kotelyanets, E.A., 2023. Influence of Organic Matter Content in Bottom Sediments in Crimean Water Areas with Intensive Water Exchange on Zinc, Chromium, and Nickel Accumulation. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 65–76. EDN TZBTZD. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-65-76

Введение

Прибрежные акватории Крыма подвергаются комплексному воздействию в результате поступления в прибрежные районы органического вещества антропогенного и природного происхождения. Именно органические вещества, вне зависимости от их генезиса, играют важную роль в формировании типа осадков и их способности к накоплению различных веществ, поступающих с осадочным материалом, в том числе макро- и микроэлементов. Пространственное распределение микроэлементов и тяжелых металлов в донных отложениях определяется содержанием в них органического и неорганического углерода и их гранулометрическим составом [1]. В предыдущих работах были рассмотрены индивидуальные особенности пространственного распределения микроэлементов и тяжелых металлов в поверхностном слое донных отложений исследуемых акваторий Каламитского [2] и Феодосийского [3] заливов, Керченского пролива [4].

Цель работы – оценить влияние содержания органического углерода в донных отложениях прибрежных акваторий Крыма с интенсивным водообменом на особенности пространственного распределения цинка, никеля и хрома.

Материалы и методы

Мы проанализировали данные, полученные в экспедиционных исследованиях в акваториях Каламитского (2011, 2012 гг.), Феодосийского (2006 г.) заливов и Керченского пролива (2007, 2008 гг.) (рис. 1).

На рис. 1 представлено расположение станций отбора проб донных отложений в исследуемых районах. Отбор проб проводился с использованием пробоотборников Петерсона согласно ГОСТ 17.1.5.01-80 и ДСТУ ISO 5667-19:2007¹⁾. Исследовали верхний слой осадков (0–5 см). Исследуемые металлы (валовые формы) определяли рентгенофлуоресцентным методом анализа на приборе «Спектроскан МАКС-G»²⁾. Для оценки воспроизводимости и точности измерений содержания цинка, никеля и хрома применялся анализ сертифицированного донного осадка ДСЗУ 163.1-98 в восьми повторностях¹⁾.

Концентрацию органического углерода в пробе определяли спектрофотометрическим методом после окисления органического вещества сульфохромной смесью (ДСТУ ISO 14235-2005³⁾; ДСТУ 4289:2004⁴⁾. Ошибка определения содержания органического вещества для свежесожденных осадков составляет до 3 %, когда его содержание не превышает 2.5 %^{3), 4)}.

¹⁾ ГОСТ 17.1.5.01-80. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1980. 5 с.

²⁾ Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа. М049-П/02. Санкт-Петербург : ООО «Спектрон», 2002. Свидетельство № 2420/53-2002. 16 с.

³⁾ ДСТУ ISO 14235-2005. Качество грунта. Определение органического углерода сульфохромным окислением (ISO 14235-1998, IDT). Киев : Держспоживстандарт Украины, 2007. 10 с.

⁴⁾ ДСТУ 4289:2004. Качество грунта. Методы определения органического вещества. Киев : Держспоживстандарт Украины, 2005. 14 с.

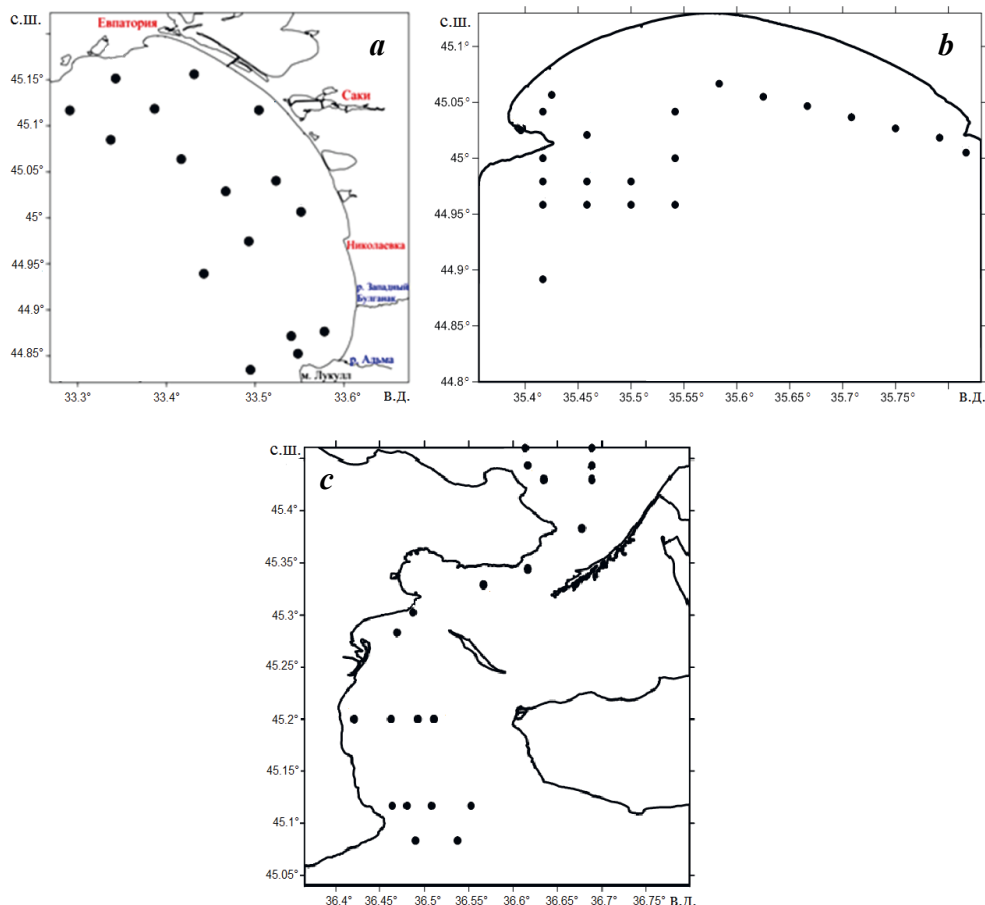


Рис. 1. Районы отбора проб донных отложений в прибрежных акваториях Крыма: *a* – в Каламитском заливе (август 2011 г.; сентябрь 2012 г.); *b* – Феодосийском заливе (2006 г.); *c* – Керченском проливе (декабрь 2007 г., март 2008 г.). Точками обозначены станции

Fig. 1. Bottom sediment sampling areas in the coastal water areas of Crimea: *a* – Kalamita Bay (August 2011; September 2012); *b* – Feodosiya Bay (2006, 22 stations); *c* – the Kerch Strait (December 2007; March 2008) The points denote stations

Отсутствие или наличие корреляции между содержанием тяжелых металлов и содержанием органического углерода выявляли по методике построения матриц парных корреляций (табл. 1) в программе *Statistika* 6.0 [5].

Результаты и обсуждение

Каламитский и Феодосийский заливы и Керченский пролив, как прибрежные акватории Крыма с интенсивным водообменом, подвержены влиянию природно-климатических и антропогенных факторов.

Каламитский залив вследствие своего географического расположения открыт влиянию глубоководной части Черного моря. Он является переходным звеном от открытой части моря к северо-западному шельфу и благополучно избегает таких явлений, как придонная гипоксия и последующие заморы

Т а б л и ц а 1 . Коэффициенты корреляции между содержанием $C_{орг}$ и исследуемых металлов
 Table 1 . Coefficients of correlation between $C_{орг}$ and studied metals

Элемент / Element	$C_{орг} / C_{орг}$		
	Каламитский залив / Kalamita Bay	Феодосийский залив / Feodosiya Bay	Керченский пролив / Kerch Strait
Zn	0.8	0.9	0.7
Ni	0.8	0.5	0.7
Cr	0.7	0.3	0.8

рыбы. Отсутствие обильного пресноводного стока и значительной промышленной инфраструктуры на берегах Западного Крыма, а также ничем не нарушаемый водообмен с глубоководной частью моря делают воды залива более похожими на воды открытого моря.

Феодосийский залив является одним из наименее изученных районов побережья Черного моря с точки зрения структуры и динамики вод и их геохимического состава в условиях современной антропогенной нагрузки. Этот район длительное время использовался как полигон военно-морских сил СССР, что исключало возможность получения натуральных данных в экспедиционных исследованиях гражданских судов. При этом Феодосийский регион имеет важное рекреационное значение. Дуга побережья Феодосийского залива обрамлена пляжной полосой [3].

Керченский пролив – это район интенсивного судоходства. Работа портов существенно сказывается на экологической ситуации в регионе, свой негативный вклад вносят также пункты рейдовой перевалки грузов в юго-западной части пролива [6].

Согласно ранее опубликованным данным [7], геохимический фон перечисленных металлов повышен в донных отложениях вне зависимости от гидродинамической ситуации в прибрежных акваториях. А в соответствии с данными работы [7] и работы⁵⁾ эти металлы способны образовывать устойчивые комплексы с различными органическими лигандами. Это подтверждает и величина рассчитанных в работе положительных коэффициентов корреляции содержания данных металлов с содержанием органического вещества в донных отложениях (табл. 1).

Цинк. Содержание цинка в морской воде и донных отложениях очень часто превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК). Максимальные концентрации элемента часто определяются на шельфе Крымского полуострова и в акватории Керченского пролива. Источники поступления данного элемента носят в основном антропогенный характер [4].

Никель. Для акватории шельфовой зоны Крымского полуострова главным источником поступления Ni является речной сток. Повышенные концентрации никеля часто определяются в акваториях с активными судоходными

⁵⁾ Митропольский А. Ю., Безбородов А. А., Овсяный Е. И. Геохимия Черного моря. Киев : Наукова думка, 1982.

магистралями, такой акваторией в нашей работе является акватория Керченского пролива. Благодаря активным адсорбционным процессам и незначительной геохимической подвижности Ni накапливается в донных отложениях в непосредственной близости от основных источников поступления [4].

Хром. Высокое содержание хрома в донных осадках шельфовой зоны Черного моря определяется близостью источников поступления этого элемента. В работах [2–4] говорится о том, что Cr может поступать в акваторию и с речными водами. Повышенные концентрации хрома в донных отложениях часто связывают [2–4] с антропогенными источниками.

Содержание органического углерода в донных отложениях исследуемых акваторий представлено в табл. 2.

В результате выполненных в акватории Каламитского залива исследований получены данные об особенностях пространственного распределения тяжелых металлов, которое повторяло распределение органического углерода в донных отложениях залива. На рис. 2 показано распределение $C_{орг}$, Zn, Ni и Cr. Значительные концентрации этих элементов наблюдались в мористой части акватории залива, а минимальные – в прибрежной части, что совпадает с распределением органического вещества в осадках залива (табл. 3).

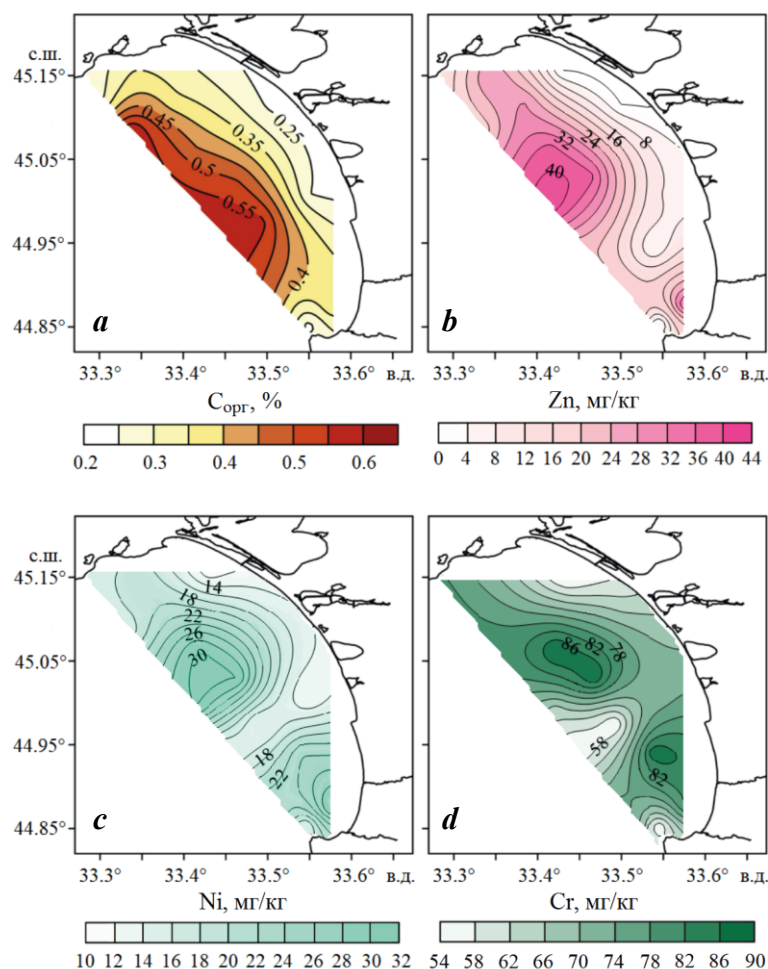
Повышенное содержание Cr (рис. 2, *d*) отмечено в донных отложениях центральной и северной частей залива. Среднее содержание хрома составляло 64 мг/кг, а максимальное – 90 мг/кг. Максимальное содержание цинка составляло 36 мг/кг, что не превышало его концентрацию в донных осадках шельфа [7] и соответствовало его содержанию в земной коре по А. П. Виноградову⁶⁾. Максимальное содержание никеля – 31 мг/кг, что не превышает фоновых значений, характерных для данной акватории [8]. Превышение геохимического фона отмечено только для хрома.

Т а б л и ц а 2. Содержание органического углерода (%) в донных отложениях исследуемых акваторий

T a b l e 2. Organic carbon content (%) in the bottom sediments of the studied water areas

Акватория / Water area	$C_{орг} / C_{орг}$			
	Пределы содержания / Content range	Среднее содержание / Average content	Прибрежная часть / Coastal part	Мористая часть / Seaward part
Каламитский залив / Kalamita Bay	0.07–0.6	0.07–0.11	0.23–0.4	0.24–0.6
Феодосийский залив / Feodosiya Bay	0.2–3.3	1.2	1.8–3.2	0.8–1.1
Керченский пролив [9] / Kerch Strait [9]	0.12–3.35	1.25	2.0–3.0	0.12–1.0

⁶⁾ Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в горных породах // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.

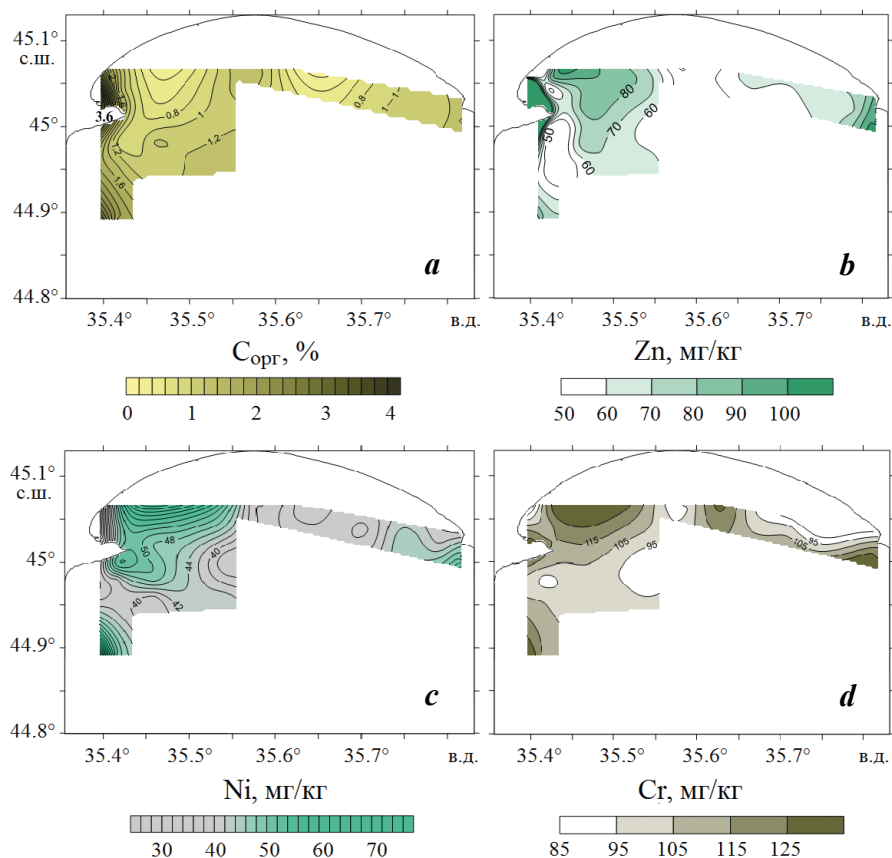


Р и с . 2 . Пространственное распределение органического углерода (а), цинка (b), никеля (c), хрома (d) в донных отложениях Каламитского залива

Fig . 2 . Spatial distribution of organic carbon (a), zinc (b), nickel (c), and chrome (d) in the bottom sediments of Kalamita Bay

Содержание органического углерода в донных отложениях залива колеблется в пределах 0.07–0.11 %. Концентрация $C_{орг}$ в прибрежной части залива составляет 0.23–0.40 %, а в мористой части – 0.24–0.60 %. Максимальные положительные значения корреляции содержания элемента с содержанием органического углерода зафиксированы для Zn ($r = 0.8$), Ni ($r = 0.8$) и Cr ($r = 0.7$) (табл. 2).

Феодосийский залив. Согласно данным работы [2], содержание $C_{орг}$ в донных отложениях Феодосийского залива не превышало 1.2 % сух. массы. По результатам исследований, выполненных в акватории Феодосийского залива, были определены зоны повышенного содержания цинка и хрома. Показано, что средние значения валовой концентрации исследуемых металлов в донных отложениях Феодосийского залива не превышают значения геохимического



Р и с . 3 . Пространственное распределение органического углерода (а), цинка (b), никеля (c) и хрома (d) в донных отложениях Феодосийского залива

Fig. 3. Spatial distribution of organic carbon (a), zinc (b), nickel (c), and chrome (d) in the bottom sediments of Feodosiya Bay

фона (табл. 3). Согласно расчетам, максимальный коэффициент корреляции отмечен для цинка ($r = 0.9$) (табл. 1).

Из рис. 3 следует, что зоны повышенного содержания цинка, хрома и никеля, а также $C_{\text{орг}}$ наблюдаются в акватории расположенного в заливе города и порта Феодосии. В мористой части залива наблюдается более низкое содержание исследуемых металлов.

Керченский пролив подвержен существенному влиянию как природно-климатических, так и антропогенных факторов (интенсивные транспортные потоки, дноуглубление). При этом для пролива характерны вдольпроливные течения, направление которых меняется вплоть до противоположного в зависимости от преобладающего направления и скорости ветра. Специфика исследуемой акватории нашла отражение в общем характере пространственного распределения исследуемых тяжелых металлов в донных отложениях пролива.

Содержание $C_{\text{орг}}$ в донных отложениях части пролива, прилегающей к Керченскому полуострову, в современный период колеблется от 0.12 до 3.35 мас. % при среднем значении 1.25 мас. % (см. табл. 2) [9].

Пространственное распределение никеля, цинка и хрома в зависимости от содержания органического углерода в донных отложениях Керченского пролива представлено на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что пространственное распределение Zn, Ni, Cr в акватории пролива соответствует распределению органического вещества с образованием максимумов в предпроливной зоне Азовского моря и в прибрежной

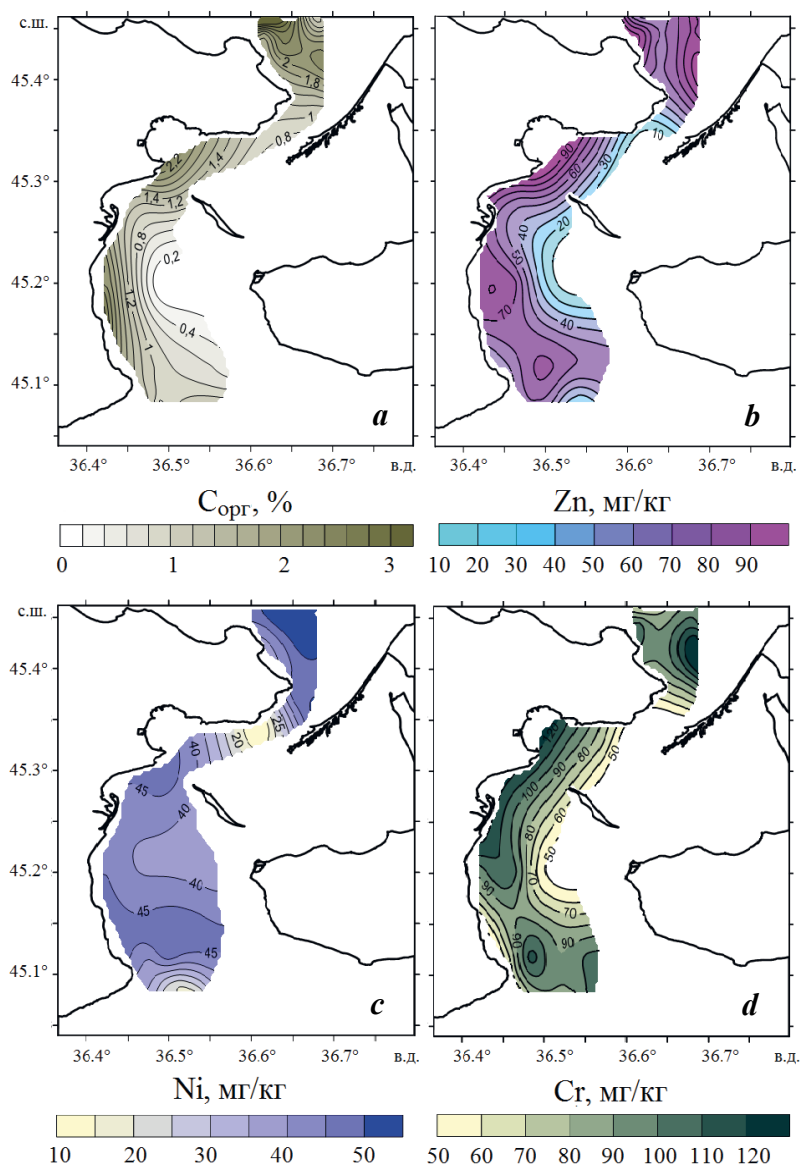


Рис. 4. Пространственное распределение органического углерода (a), цинка (b), никеля (c), хрома (d) в донных отложениях Керченского пролива

Fig. 4. Spatial distribution of organic carbon (a), zinc (b), nickel (c) and chrome (d) in the bottom sediments of the Kerch Strait

Таблица 3. Накопление микроэлементов (мг/кг) в донных отложениях Каламитского и Феодосийского заливов, Керченского пролива по отношению к геохимическому фону

Table 3. Microelement accumulation level (mg/kg) in the bottom sediments of Kalamita Bay, Feodosiya Bay and the Kerch Strait against the geochemical background

Элемент / Elements	Содержание / Content			Кларки по А. П. Виноградову ⁶⁾ / Clarks according to A.P. Vinogradov	Среднее содержание в донных отложениях шельфа [8] / Average content in shelf bottom sediments
	Каламитский залив (2011, 2012 гг.) / Kalamita Bay (2011, 2012)	Феодосийский залив (2006 г.) / Feodosiya Bay (2006)	Керченский пролив (2007, 2008 гг.) / Kerch Strait (2007, 2008)		
Zn	4-48	50-412	25-78	83	60
Ni	10-32	34-54	10-50	58	34
Cr	48-90	87-124	43-147	83	45

части пролива. При этом высокие значения коэффициентов корреляции содержания металлов с содержанием органического вещества донных отложений позволяют предположить, что эти загрязняющие вещества накапливаются в донных отложениях Керченского пролива.

Уровни накопления тяжелых металлов Zn, Ni, Cr в донных отложениях акваторий с интенсивным водообменом по отношению к геохимическому фону представлены в табл. 3.

Из данных, представленных в табл. 3, видно, что концентрации Zn и Ni в донных отложениях Каламитского залива ниже, чем в осадках Феодосийского залива, Керченского пролива и фоновых районов черноморского шельфа [7]. При этом в Каламитском заливе, как акватории с низким содержанием органического вещества в донных отложениях, превышение геохимического фона наблюдается только для хрома вследствие ощутимой корреляции содержания металла с содержанием $C_{орг}$ (0.7) (см. табл. 1).

Показано, что в донных отложениях районов с повышенным содержанием органического углерода (Феодосийский залив и Керченский пролив) характерным является превышение геохимического фона таких металлов, как цинк и хром.

Отмечено, что геохимический фон для никеля не превышен ни в одной из исследуемых акваторий (табл. 3). При этом, несмотря на превышение геохимического фона для хрома в Феодосийском заливе, коэффициент корреляции содержания этого металла с содержанием органического вещества довольно низкий ($r = 0.3$) (табл. 1). Возможно,

что, кроме органического вещества, накоплению исследуемых металлов способствуют другие компоненты донных осадков, которые мы в этой работе не рассматриваем.

Выводы

Анализ массива натуральных данных позволил оценить пространственную неоднородность в распределении Zn, Ni, Cr в донных отложениях Каламитского и Феодосийского заливов, Керченского пролива с учетом уровней содержания органического вещества и рассчитанных коэффициентов корреляции содержания металлов с содержанием $C_{орг}$.

Причиной высоких значений этих коэффициентов корреляции для акваторий с интенсивным водообменом является способность исследуемых металлов образовывать стойкие соединения с органическими лигандами.

Пространственная неоднородность распределения органического вещества определяется гидродинамическим режимом рассмотренных акваторий и его интенсивностью. Такая неоднородность распределения влияет также на особенности поведения исследуемых металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Органическое вещество и гранулометрический состав современных донных отложений Балаклавской бухты (Черное море) / Н. А. Орехова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 6. С. 523–533. EDN VNVPHL. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-523-533
2. Геохимические характеристики донных отложений акватории Каламитского залива Черного моря / К. И. Гуров [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 5. С. 69–80. EDN TECAXV.
3. *Котельянец Е. А., Коновалов С. К.* Распределение тяжелых металлов в донных отложениях Феодосийского залива // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 17. С. 171–175.
4. *Котельянец Е. А., Коновалов С. К.* Тяжелые металлы в донных отложениях Керченского пролива // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 4. С. 50–60.
5. *Шигабаева Г. Н., Ахтырская Е. О.* Корреляционный анализ содержания тяжелых металлов в донных отложениях // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. Т. 3, № 2. С. 55–59. EDN SXGOAD.
6. Оценка загрязнения Керченского пролива и прилегающей акватории Черного моря по данным натуральных измерений 2019–2020 гг. / П. О. Завьялов [и др.] // Океанология. 2022. Т. 62, № 2. С. 194–203. EDN YHPENI. doi:10.31857/S0030157422020174
7. *Котельянец Е. А.* Особенности накопления макро- и микроэлементов в донных отложениях прибрежных акваторий Крыма (Черное море) с различной интенсивностью водообмена по данным РФА // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 106–120. EDN EZYRRW. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-106-120
8. Геоэкология Черноморского шельфа Украины / В. А. Емельянов [и др.]. Киев : Академперіодика, 2004. 296 с.
9. Органический углерод и карбонатность современных донных отложений Керченского пролива / Е. И. Овсяный [и др.] // Геохимия. 2015. № 12. С. 1120–1131. EDN UVEMQL. doi:10.7868/S0016752515120079

Поступила 16.12.2022 г.; одобрена после рецензирования 21.01.2023 г.; принята к публикации 01.02.2023 г.; опубликована 24.03.2023 г.

Об авторах:

Совга Елена Евгеньевна, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0670-4573**, **SPIN-код: 8675-2443**, **ResearcherID: A-9774-2018**, *esovga@mhi-ras.ru*

Котельянец Екатерина Александровна, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ResearcherID: AAA-8699-2019**, *plistus@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Совга Елена Евгеньевна – формулировка и постановка задачи, критический анализ и доработка текста

Котельянец Екатерина Александровна – отбор проб, определение исследуемых микроэлементов, качественный и количественный анализ результатов, подготовка графических материалов, формулировка задачи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Атмосферное поступление силикатов в Крыму и факторы, влияющие на него

А. В. Вареник, М. А. Мыслина *, Д. В. Тарасевич

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: myslina@mhi-ras.ru*

Аннотация

Кремний относится к основным биогенным элементам (N, P, Si) и входит в состав большого числа природных минералов, вследствие чего постоянно присутствует в природных водах. В природе он в основном присутствует в виде солей кремниевой кислоты (силикатов). Атмосферные осадки могут быть важным дополнительным источником поступления силикатов в экосистему. Целью данной работы является оценка содержания силикатов в атмосферных выпадениях на основе многолетних данных, анализ пространственно-временной изменчивости этого содержания, а также выявление возможных факторов, влияющих на атмосферное поступление силикатов. Представлены результаты непрерывного мониторинга поступления силикатов с атмосферными осадками в районе крымского побережья в 2015–2021 гг. Пробы осадков отбирались в г. Севастополе и п. Качивели в два типа осадкосборников – постоянно открытый для отбора суммарных (сухие + влажные) атмосферных выпадений и для сбора только влажных атмосферных осадков. Показано, что в межгодовой динамике потока силикатов с атмосферными осадками в обоих пунктах отбора проб максимальная величина поступления этого биогенного элемента была определена в 2017–2018 гг. Выявлены основные факторы, влияющие на величину поступления силикатов с атмосферными осадками. Одним из основных факторов, влияющих на величину концентрации силикатов в осадках, является интенсивность пылевого переноса.

Ключевые слова: силикаты, отбор проб, атмосферные осадки, Крым, пылевые атмосферные выпадения, многолетнее изменение

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме FNNN-2021-0005 «Прибрежные исследования». Авторы выражают благодарность сотрудникам Морской гидрометеорологической станции г. Севастополя и Черноморского гидрофизического подспутникового полигона ФГБУН ФИЦ МГИ за отбор проб атмосферных осадков и подготовку их к транспортировке в отдел биогеохимии моря ФГБУН ФИЦ МГИ для выполнения химического анализа.

©Вареник А. В., Мыслина М. А., Тарасевич Д. В., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Вареник А. В., Мыслина М. А., Тарасевич Д. В. Атмосферное поступление силикатов в Крыму и факторы, влияющие на него // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 77–90. EDN VYBJPN. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-77-90

Atmospheric Input of Silica in Crimea and Factors Affecting it

A. V. Varenik, M. A. Myslina *, D. V. Tarasevich

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: myslina@mhi-ras.ru*

Abstract

Silica is one of the main nutrients (N, P, Si) and is a part of a large number of natural minerals, so it is constantly present in natural waters. It is mainly present as salts of silicic acid (silica). Atmospheric precipitation can be an important additional source of silica in the ecosystem. The purpose of this work is to estimate the silica content in the atmospheric precipitation based on long-term data, analyze the spatial and temporal variability of this content, and identify possible factors influencing the atmospheric silica input. The paper presents the results of continuous monitoring of silica input with the atmospheric precipitation in the Crimean coastal region in 2015–2021. Precipitation samples were collected in Sevastopol and Katsiveli in two types of samplers: a permanently open one to collect total (dry + wet) atmospheric precipitation and a wet-only one. It is shown that in the inter-annual dynamics of silica flux with the atmospheric precipitation in the both sampling points, the maximum input amount of this nutrient was determined in 2017–2018. The main factors influencing the amount of silica input with the atmospheric precipitation were determined. One of the main factors influencing the silica concentration in precipitation is the intensity of dust transport.

Keywords: silica, sampling, atmospheric precipitation, Crimea, dust atmospheric precipitation, long-term changes

Acknowledgements: The work was carried out under state assignment of FSBSI FRC MHI on the subject FNNN-2021-0005 “Coastal research”. The authors are grateful to the staff of the Sevastopol Marine Hydrometeorological Station and the Black Sea hydrophysical sub-satellite test site FSBSI FRC MHI for collecting the atmospheric precipitation samples and preparing them for transportation to the Marine Biogeochemistry Department of the FSBSI FRC MHI for chemical analysis.

For citation: Varenik, A.V., Myslina, M.A. and Tarasevich, D.V., 2023. Atmospheric Input of Silica in Crimea and Factors Affecting it. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 77–90. EDN VYBJPN. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-77-90

Введение

Кремний (Si) – второй по распространенности (после кислорода) химический элемент в земной коре, где его содержание составляет около 29 % [1]. В природе он в основном присутствует в виде солей кремниевой кислоты (силикатов). Силикаты являются одним из основных элементов в биогеохимических циклах в биосфере и играют важную роль в жизнедеятельности многих живых организмов.

Существуют природные и антропогенные источники поступления Si в окружающую среду. В процессе выветривания соединения кремния попадают в экосистему в форме растворенной ортокремниевой кислоты (H_4SiO_4), чему

способствуют химические, физические и биологические факторы [2]. Природным источником поступления Si в атмосферу может являться также пылевой перенос [3]. Например, в работе [4] было показано, что поднятие большого количества пылевого аэрозоля сильными восходящими потоками способствует миграции микробиоты и минеральных веществ, в том числе высоких концентраций силикатов, на десятки тысяч километров.

Антропогенные источники поступления силикатов в атмосферу имеют локальный характер. Например, при сжигании бурого и каменного углей [5] в процессе образуется зола, содержащая кремний, и ее частицы в большом количестве встречаются в районах с развитой промышленностью. Однако глобальные оценки промышленных выбросов кремния отсутствуют [6]. Другим источником поступления силикатов в атмосферу могут являться компании, занимающиеся зерноперевалочными работами. При разгрузке и транспортировке зерна выделяется значительное количество зерновой пыли, содержащей элементы удобрений, в состав которых входят и силикаты¹⁾. В г. Севастополе, например, находится стивидорная компания «АВАЛ», которая занимается обработкой зерновых, контейнерных, навалочных, негабаритных и тяжеловесных грузов. Общий объем перевалки зерна данной компанией в 2017 г. достигал 583.7 тыс. т, что в 2.5 раза больше, чем в 2016 г.²⁾

Кремний относится к основным биогенным элементам (N, P, Si) и входит в состав большого числа природных минералов, вследствие чего постоянно присутствует в природных водах³⁾. Главным образом Si участвует в формировании экзоскелета простейших гидробионтов, таких как диатомовые водоросли и силикофлагелляты, кораллы, губки и радиолярии. Силикаты потенциально могут лимитировать продуцирование фитопланктона и влиять на продукционный цикл диатомовых водорослей [7].

В работе [8] на примере Геленджикской бухты рассмотрена зависимость развития крупной диатомовой водоросли *Rhizosolenia calcaravis* от концентрации силикатов. Показано, что при снижении содержания силикатов в воде интенсивность ее развития и количество биомассы уменьшается. В результате может происходить восстановление естественного баланса видов черноморского фитопланктона (*Skeletonema costatum* и *Talassionema nitzschioides*) при высоком содержании минеральных соединений азота и фосфора [8].

Согласно работе⁴⁾, снижение численности силикофлагеллят, которые чувствительны к содержанию кремния, совпадает с уменьшением концентрации

¹⁾ Очистка выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух при производстве продукции (товаров), а также при проведении работ и оказании услуг на крупных предприятиях : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям : ИТС 22-2016. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&document-Id=386163#h1355> (дата обращения: 16.01.2022).

²⁾ URL: https://www.korabel.ru/news/comments/novorossiyskiy_port_lider_2017_goda_sredi_gruzov_vyh_termi-nalov_rossii.html (дата обращения: 25.11.2022).

³⁾ Массовая концентрация кремния в морской воде. Методика измерений фотометрическим методом в виде синей формы молибдокремниевой кислоты : РД 52.10.744-2020. Введ. 2021-02-22. Москва : Росгидромет, 2020. 9 с.

⁴⁾ Микаэлян А. С. Временная динамика фитопланктона глубоководного бассейна Черного моря : автореферат дис. ... доктора биологических наук. Москва, 2018. 51 с.

Si в пикноклине и холодном промежуточном слое (ХПС). Автор этой работы предполагает, что, в отличие от диатомовых водорослей, многолетнее снижение содержания силикатов в пикноклине и ХПС и, как следствие, в фотической зоне вполне могло привести к ограничению роста силикофлагеллят в глубоководном бассейне.

Дополнительными источниками поступления силикатов в экосистему могут быть (см. РД³⁾ и [9]):

- бытовые стоки, которые образуются в результате использования синтетических моющих средств, содержащих силикаты;
- сточные воды промышленных предприятий, изготавливающих силикатные материалы;
- подземные воды и реки, которые омывают сушу и выносят огромные количества кремнезема в виде взвесей глинистых частиц, обломков алюмосиликатов и растворов;
- материковый сток.

Вклад крупных рек в баланс биогенных элементов, выпадающих в Черное море, по оценкам ученых [10], составляет от 2 до 6 %, однако в работе [10] не учитывается вклад средних и малых рек.

В работе⁵⁾ показано, что в приустьевом районе Дуная в результате подъема придонных вод к поверхности (апвеллинга) было зафиксировано значительное увеличение содержания биогенных элементов в поверхностных водах. При этом при гипоксических условиях в придонных водах отмечались концентрации, которые превышали содержание силикатов в поверхностных приустьевых водах.

Одним из источников поступления Si в водные объекты являются также донные отложения, которые образуются в результате отмирания и разложения остатков наземных (хвойных, злаковых, осоковых) и водных (диатомеи) растений, способных концентрировать кремний [9]. Диатомеи извлекают 70–80 % кремнезема из воды. После гибели они растворяются, кремний высвобождается и переходит в растворимую форму. Нерастворимые части оседают на дне, образуя обширные отложения диатомовых илов. Так формируется биогеохимический цикл кремния⁶⁾.

Деятельность человека в XX веке значительно изменила процесс круговорота биогенных элементов, в том числе и кремния [11]. При этом более консервативные свойства силикатов, в отличие от, например, фосфора и азота, способствуют меньшей интенсивности изменения круговорота кремния. Однако непропорциональные изменения в круговороте и содержании фосфатов и неорганического азота в морских экосистемах могут привести к относительному снижению содержания силикатов. В свою очередь, это ограничение может повлиять на развитие диатомовых водорослей и сдвиг равновесия в экосистемах.

⁵⁾ Еремченко О. З. Учение о биосфере. Организованность биосферы и биогеохимические циклы : учебное пособие. Пермь : Издательство Пермского государственного университета, 2010. 104 с.

⁶⁾ Завальцева О. А. Основы биогеохимии : учебное пособие для студентов, обучающихся по программе бакалавриата специальностей «Почвоведение», «Экология» «Природопользование», «Химия». Ульяновск : УлГУ, 2012. 71 с.

Поступление силикатов в морские экосистемы происходит и в результате процессов сухого и влажного осаждения [12], где они находятся в растворимой форме и в виде взвешенных в воде минеральных частиц³⁾. Химический состав атмосферных осадков характеризуется временной и пространственной изменчивостью, а также является чувствительным индикатором загрязнения атмосферы и в определенной мере может отражать общерегиональную нагрузку на данной территории [13]. По оценкам в работе⁵⁾, с континентов в океан поступает от 600 млн до 1.6 млрд т эоловой пыли. Атмосферные осадки, содержащие биогенные элементы, могут менять классическое соотношение Редфилда [14], что может влиять на общее состояние экосистемы и приводить к эвтрофикации.

Ранее упоминалось [15], что кремний не относится к загрязняющим элементам, однако анализ распределения Si позволяет оценить влияние естественных процессов и антропогенных факторов на формирование гидрохимической структуры вод.

Целью данной статьи является оценка содержания силикатов в атмосферных выпадениях на основе многолетних данных, полученных в МГИ, анализ пространственно-временной изменчивости этого содержания, а также выявление возможных факторов, влияющих на атмосферное поступление силикатов.

Методы и материалы

Район отбора проб

Пробы атмосферных осадков отбирались в двух пунктах крымского побережья – г. Севастополе и п. Кацивели (рис. 1). Для каждого случая осадков фиксировались метеоусловия на момент их начала (скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, атмосферное давление), а также количество осадков.

В г. Севастополе пробы отбирались в два типа осадкоборников – постоянно открытый для отбора проб суммарных (влажные + сухие) выпадений и открывающийся только во время выпадения осадков. Автоматический осадкоборник был установлен на высоте 1.5 м над подстилающей поверхностью на метеостанции, работающей в круглосуточном режиме. В п. Кацивели до середины 2016 г. в качестве осадкоборника использовался осадкомер Третьякова, что позволяло отбирать только суммарные (сухие + влажные) атмосферные выпадения. В середине 2016 г. нами был приобретен и установлен в п. Кацивели автоматический осадкоборник. В результате у нас появилась возможность получать осадки как суммарные, так и только влажные без влияния сухих выпадений. В обоих



Рис. 1. Точка отбора проб атмосферных осадков (источник рисунка на врезке: <https://gidcrima.ru/sevastopol/dostoprimechatelnosti/buh-ty-sevastopolya/>)

Fig.1. The location of the precipitation sampling point (the source of the inset map: <https://gidcrima.ru/sevastopol/dostoprimechatelnosti/buhty-sevastopolya/>)

пунктах отбора проб осадкосборники устанавливались на открытых площадках в удалении от зданий и деревьев.

Метод отбора проб

Пробы атмосферных осадков отбирались за каждый случай выпадения дождя или снега. Если перерыв в осадках был более 1 ч и изменилась облачность, то следующие осадки отбирались как отдельная проба. Отобранные пробы переливались в предварительно промытые нальгеновые банки и замораживались для исключения возможности химической и микробиологической трансформации отобранных проб. Затем пробы доставлялись в отдел биогеохимии моря ФГБУН ФИЦ МГИ для химического анализа.

Химический метод анализа

Анализируются на содержание силикатов только те осадки, объем которых позволял проводить химический анализ. Спектрофотометрический метод определения силикатов основан на образовании голубого кремнемолибденового комплекса. Диапазон определяемых концентраций составляет 0.05–20 мкмоль/л. Согласно работе ⁷⁾, погрешность метода составляет 20 % при определении концентраций до 0.36 мкмоль/л, ± 10 % до 0.71 мкмоль/л и $\pm 3 \dots 5$ % при определении более высоких концентраций.

Результаты

За исследуемый период было проанализировано более 500 проб для каждого осадкосборника в г. Севастополе, более 200 проб, отобранных в открытый осадкосборник, и более 350 проб – отобранных в закрытый осадкосборник в п. Кацивели. Содержание силикатов в атмосферных осадках г. Севастополя превышало их содержание в осадках п. Кацивели. Максимальная концентрация в открытом осадкосборнике в г. Севастополе была определена в ноябре, в закрытом – в сентябре. В то же время в п. Кацивели для обоих типов осадкосборников максимальные концентрации силикатов были более характерны для теплого периода (июнь – июль), что соответствует ранее опубликованным данным [2].

Некоторые статистические характеристики концентраций силикатов представлены в таблице.

В межгодовой динамике потока силикатов с атмосферными осадками в обоих пунктах мониторинга наблюдается сходное квазипериодическое изменение (рис. 2).

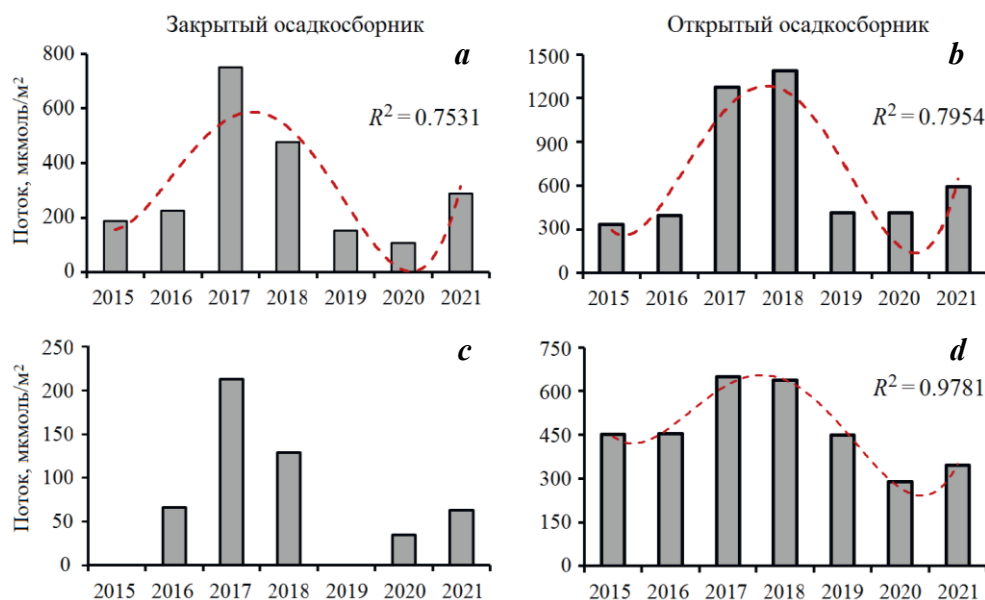
Данных для закрытого осадкосборника в п. Кацивели недостаточно для построения линии тренда, но просматривается то же квазипериодическое изменение потока силикатов. Максимальный их поток с атмосферными осадками был определен в 2017–2018 гг. в обоих пунктах отбора проб. При этом можно увидеть, что поступление силикатов с осадками в п. Кацивели по данным о концентрациях, определенных в пробах закрытого осадкосборника, значительно меньше поступления в г. Севастополе. Однако, оценивая поток поданным для открытого осадкосборника, мы видим, что он меньше только в 2017–

⁷⁾ Методы гидрохимических исследований океана : [руководство / В. Н. Иваненков и др. ; отв. ред. О. К. Бордовский, В. Н. Иваненков]. Москва : Наука, 1978. 271 с.

Статистические характеристики содержания силикатов в пробах атмосферных осадков в пунктах мониторинга

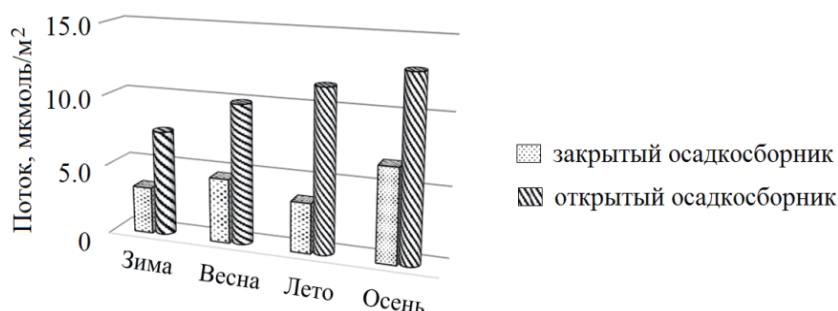
Statistical characteristics of silica content in precipitation samples

Характеристика / Characteristic	г. Севастополь / Sevastopol		п. Кацивели / Katsiveli	
	Закрытый осадко-сборник / Wet-only sampler	Открытый осадко-сборник / Permanently open sampler	Закрытый осадко-сборник / Wet-only sampler	Открытый осадко-сборник / Permanently open sampler
Максимальная концентрация, мкмоль/л / Maximum concentration, $\mu\text{mol/L}$	34.46	36.79	4.96	13.58
Минимальная концентрация, мкмоль/л / Minimum concentration, $\mu\text{mol/L}$	0	0	0	0
Средневзвешенная концентрация, мкмоль/л / Weighted average concentration, $\mu\text{mol/L}$	0.78	1.78	0.23	1.14
Стандартное отклонение, мкмоль/л / Standard deviation, $\mu\text{mol/L}$	2.69	4.56	0.63	1.69



Р и с . 2 . Межгодовое изменение потока силикатов с атмосферными осадками в г. Севастополе (a, b) и п. Кацивели (c, d)

Fig. 2. Inter-annual variation in silica flux with the precipitation in Sevastopol (a, b) and Katsiveli (c, d)



Р и с . 3 . Сезонное изменение потока силикатов с атмосферными осадками в г. Севастополе

F i g . 3 . Seasonal variation in silica flux with the atmospheric precipitation in Sevastopol

2018 гг., в то время как в остальные годы даже превышает поток в г. Севастополе. Возможной причиной этого может являться активное освоение и застраивание территории Южного берега Крыма, в том числе и п. Кацивели. И если в г. Севастополе основной вклад в поступление силикатов может давать пылевой атмосферный перенос, то в п. Кацивели, в силу географического положения, вклад пылевого переноса примерно равен вкладу антропогенной составляющей, например строительным работам и связанным с ними выбросом кремния в атмосферу.

При рассмотрении внутригодового изменения потока силикатов с атмосферными осадками в г. Севастополе было получено, что максимальный поток наблюдался в период с сентября по ноябрь как для закрытого, так и для открытого осадкосборников (рис. 3).

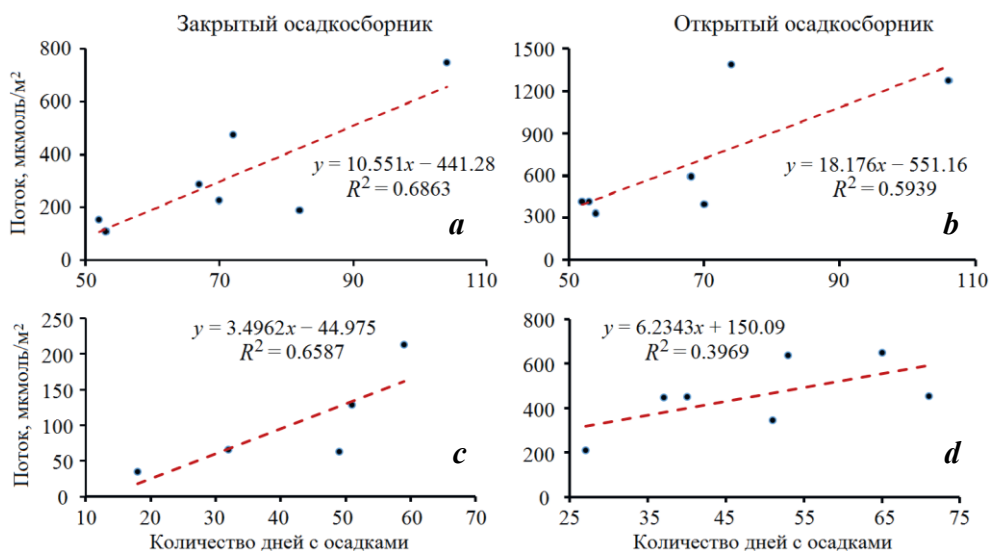
Для открытого осадкосборника было характерно постепенное увеличение потока от зимы к осени. Для проб из закрытого осадкосборника наблюдалось периодическое изменение потока силикатов с плавным повышением весной и осенью и снижением зимой и летом.

Обсуждение результатов

Факторы, влияющие на поток силикатов с атмосферными осадками

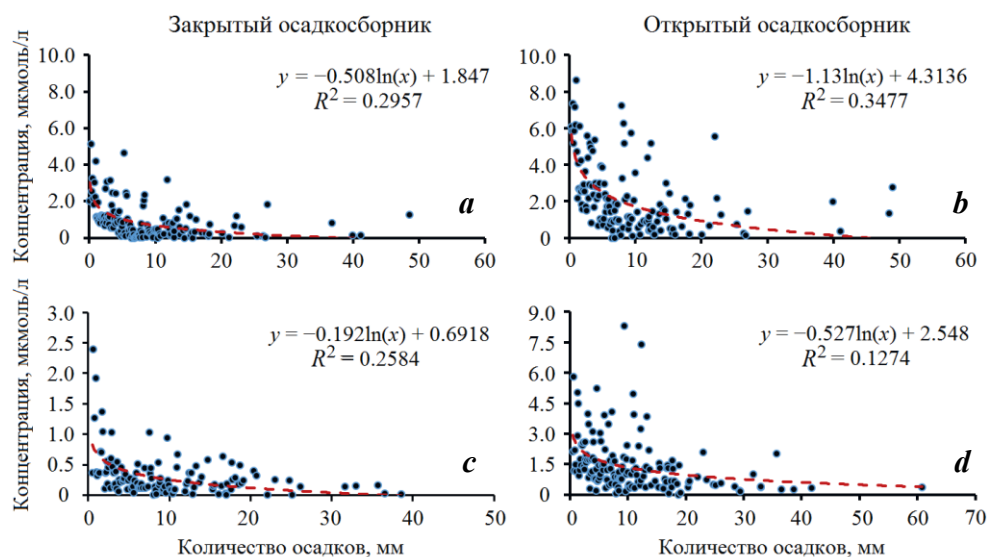
Одним из факторов, определяющих содержание различных загрязняющих веществ в атмосферных осадках, является содержание этих веществ в атмосфере⁸⁾. При этом при определенных условиях, как то: температурные инверсии, безветренная погода, перерыв между выпадениями осадков, – может происходить накопление загрязняющих веществ в воздухе. Поэтому мы оценили изменение концентрации силикатов в пробах осадков в каждом пункте мониторинга в зависимости от количества «сухих» дней между событиями осадков (рис. 4).

⁸⁾ Морозов А. Е., Стародубцева Н. И. Метеорологические условия и загрязнение атмосферы : учебное пособие. Екатеринбург : УГЛТУ, 2020. 128 с. URL: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/9800/1/Morozov_20.pdf (дата обращения: 05.03.2023).



Р и с . 4 . Концентрация силикатов в атмосферных осадках г. Севастополя (*a*, *b*) и п. Кацивели (*c*, *d*) в зависимости от количества «сухих» дней между событиями осадков

F i g . 4 . Silica concentration in precipitation in Sevastopol (*a*, *b*) and Katsiveli (*c*, *d*) depending on the number of “dry” days between precipitation events



Р и с . 5 . Концентрация силикатов в атмосферных осадках г. Севастополя (*a*, *b*) и п. Кацивели (*c*, *d*) в зависимости от количества осадков

F i g . 5 . Silica concentration in precipitation in Sevastopol (*a*, *b*) and Katsiveli (*c*, *d*) depending on changes in precipitation amount

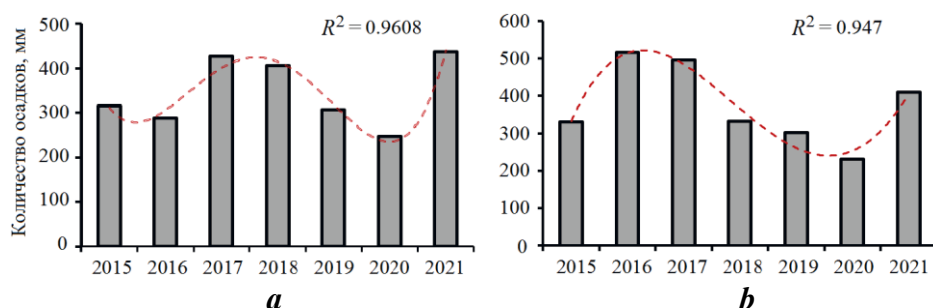
С увеличением длительности перерыва между выпадением осадков наблюдается рост концентрации силикатов в отобранных пробах осадков. Это следствие накопления силикатов в атмосфере.

Атмосферные осадки вымывают примеси, содержащиеся в атмосфере. На рис. 5 показано изменение концентрации силикатов в пробах для открытого и закрытого осадкосборников в каждом пункте наблюдения в зависимости от количества выпавших осадков.

Как видно из графиков на рис. 5, концентрация силикатов с увеличением количества выпавших осадков уменьшается, поскольку происходит разбавление при увеличении количества осадков. Эти данные соответствуют ранее опубликованным результатам [16, 17] относительно других веществ, содержащихся в атмосферных осадках.

Ранее [18] для неорганического азота было показано, что изменения потока этого биогенного элемента в атмосферных осадках определяются в первую очередь изменением количества выпавших осадков: чем больше осадков выпадает, тем больший поток неорганического азота поступает с ними. Поэтому нами был проведен анализ изменения количества осадков за каждый год периода исследования. На рис. 6 показаны гистограммы изменения суммарного за каждый год наблюдения количества выпавших осадков (для проанализированных проб).

Как видно из графиков, в г. Севастополе наблюдается сходная периодичность в изменении как количества осадков (рис. 6), так и потока силикатов (см. рис. 2). Максимальное годовое количество осадков было в 2017–2018 и 2021 гг. В то же время для п. Кацивели наблюдается некоторое различие в периодичности изменения потока силикатов (см. рис. 2) и суммарного годового количества выпавших осадков (рис. 6): в 2016 г. количество выпавших за год осадков было максимальным, в то время как поток силикатов оставался на уровне 2015 г. При этом в г. Севастополе изменение количества выпавших осадков (рис. 6) происходит более плавно по сравнению с изменением потока силикатов в эти же годы (см. рис. 2). Учитывая, что силикаты являются терригенным биогенным элементом и не обладают такой растворимостью, как, например, неорганический азот, на изменение их содержания в большей степени может оказывать влияние как ветровая эрозия почвенного покрова вблизи района отбора проб, так и пылевой трансграничный перенос.



Р и с . 6 . Межгодовое изменение количества выпавших атмосферных осадков в г. Севастополе (а) и п. Кацивели (b)

Fig. 6. Inter-annual variation in precipitation amount in Sevastopol (a) and Katsiveli (b)

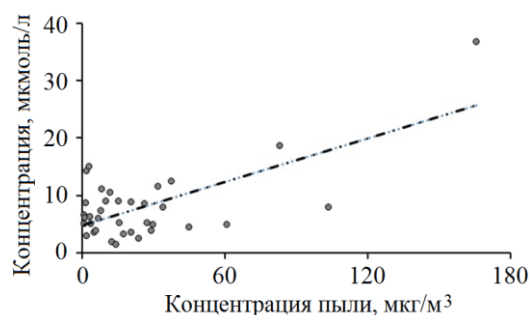


Рис. 7. Поток силикатов с атмосферными осадками в г. Севастополе в зависимости от интенсивности пылевой переноса

Fig. 7. Silica flux with the atmospheric precipitation in Sevastopol depending on the dust transport intensity

Был проведен анализ данных о концентрации силикатов в атмосферных осадках и массовой концентрации пыли в атмосферном воздухе г. Севастополя, которые были получены по результатам спутникового мониторинга⁹⁾, в сентябре–ноябре за весь исследуемый период. В результате было выявлено, что чем интенсивнее наблюдался пылевой перенос, тем выше концентрация силикатов была в пробах атмосферных осадков (рис. 7). Исходя из полученного внутригодового распределения потока силикатов с атмосферными осадками (см. рис. 3) мы предположили, что максимальное влияние на содержание силикатов в атмосферном воздухе исследуемого района пылевой перенос может оказывать именно в этот период.

Проанализировав корреляцию двух массивов данных с помощью пакета анализа «Анализ данных» в Excel, получили, что коэффициент корреляции составил 0.61. Оценка коэффициента корреляции с помощью критерия Стьюдента показала статистическую достоверность полученной зависимости.

Потенциальное влияние атмосферного выпадения кремния на морские экосистемы

Возможное влияние атмосферного выпадения силикатов на величину первичной продукции может быть посчитано исходя из соотношения C:N:P:Si, которое составляет 106:16:1:15 [19]. Морская первичная продукция зависит от многих как внешних (атмосферное, речное и промышленное поступление биогенных элементов), так и внутренних (поступление биогенных элементов в результате апвеллинга) факторов.

За исследуемый период средний поток силикатов с атмосферными осадками в г. Севастополе составил $0.75 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. При соотношении C:Si = 106:15 дополнительное количество продуцируемого органического углерода составит $5.30 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Согласно [20], среднегодовая первичная продукция в прибрежных районах составляет $140 \text{ гC} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ ($11667 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$). Исходя из полученных данных среднегодовое поступление силикатов с атмосферными осадками в г. Севастополе может привести к незначительному изменению содержания органического углерода в атмосфере – менее 0.1%. При этом, по данным анализа поступления с атмосферными осадками основных биогенных элементов, соотношение N:P:Si в атмосферных осадках г. Севастополя составляет 79:1:1.9, что сильно отличается от классического соотношения Редфилда. Это может способствовать

⁹⁾ URL:<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/> (дата обращения 28.10.2022).

тому, что в условиях высокого поступления неорганического азота с атмосферными осадками силикаты могут стать лимитирующим биогенным элементом в прибрежных акваториях Черного моря.

Заключение

В работе рассмотрено поступление силикатов с атмосферными осадками в двух пунктах крымского побережья – г. Севастополе и п. Качивели. Показано, что в межгодовой динамике потока силикатов с атмосферными осадками в обоих пунктах мониторинга наблюдается сходное квазипериодическое изменение: максимальный поток этого биогенного элемента определен в 2017–2018 гг. Выявлены основные факторы, влияющие на величину поступления силикатов с атмосферными осадками. С увеличением длительности перерыва между выпадением осадков наблюдался рост концентрации силикатов в отобранных пробах осадков, что является следствием накопления силикатов в атмосфере. В результате анализа данных о концентрации силикатов в атмосферных осадках и массовой концентрации пыли в атмосферном воздухе г. Севастополя получено, что чем интенсивнее наблюдался пылевой перенос, тем выше концентрация силикатов в пробах атмосферных осадков. При оценке возможного влияния поступления силикатов с атмосферными осадками на величину первичной продукции прибрежных районов Крыма получено, что непосредственный вклад потока силикатов может составлять незначительную величину. Однако в условиях меняющегося поступления неорганического азота и фосфатов с атмосферными осадками необходимы дальнейшие исследования для оценки вклада силикатов в состояние морских прибрежных экосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wedepohl K. H.* The composition of the continental crust // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995. Vol. 59, iss. 7. P. 1217–1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)
2. Atmospheric silicon wet deposition and its influencing factors in China / Y. Xi [et al.] // *Environmental Research*. 2022. Vol. 214, part 3. 114084. doi:10.1016/j.envres.2022.114084
3. *Kalinskaya D., Varenik A.* The research of the dust transport impact on the biogeochemical characteristics of the Black Sea surface layer // *Proceedings of SPIE*. SPIE, 2019. Vol. 11208: 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 1120845. doi:10.1117/12.2540432
4. *Калинская Д. В., Вареник А. В., Папкова А. С.* Фосфор и кремний как маркеры переноса пылевого аэрозоля над Черноморским регионом // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 3. С. 217–225. EDN XSNFSP. doi:10.21046/2070-7401-2018-15-3-217-225
5. *Леонова М. С., Потапова Е. А.* Кварцевое сырье для производства кремния в руднотермических печах // *Молодежный вестник ИрГТУ*. 2012. № 4. С. 49. EDN XTDHGB.
6. *Tegen I., Kohfeld K.* Atmospheric transport of silicon // *The silicon cycle: human perturbations and impacts on aquatic systems*. Washington, DC : Island Press, 2006. P. 81–91.

7. *Матвеев В. И., Тихомирова Е. А., Лучин В. А.* Первичная продукция Охотского моря в годы с различными термическими условиями // *Биология моря*. 2015. Т. 41, № 3. С. 179–187. EDN TTVDJX.
8. *Полякова Т. В., Полякова А. В.* Влияние изменчивости биогенной базы на фитопланктон Геленджикской бухты Черного моря // *Вопросы современной альгологии*. 2017. № 1 (13). URL: <http://algology.ru/1148> (дата обращения: 05.03.2023).
9. *Мокиенко А. В.* Кремний в воде: от токсичности к эссенциальности // *Вестник морской медицины*. 2020. № 4 (89). С. 136–142. doi:10.5281/zenodo.4430795
10. *Маккавеев П. Н., Завьялов П. О.* Сток малых и средних рек российского побережья Черного моря и его влияние на характеристики вод // *Система Черного моря*. Москва : Научный мир, 2018. С. 287–322. EDN THXBYZ. doi:10.29006/978-5-91522-473-4.2018.287-322
11. *Зоткин Г. А., Караваев Д. А.* Влияние деятельности человека на биогеохимические циклы // *Современные наукоемкие технологии*. 2013. № 8, ч. 2. С. 330.
12. *Spokes L. J., Jickells T. D.* Is the atmosphere really an important source of reactive nitrogen to coastal waters? // *Continental Shelf Research*. 2005. Vol. 25, iss. 16. P. 2022–2035. doi:10.1016/j.csr.2005.07.004
13. *Баранов Д. Ю., Моисеенко Т. И., Дину М. И.* Геохимические закономерности формирования атмосферных выпадений в условно фоновом районе Валдайского национального парка // *Геохимия*. 2020. Т. 65, № 10. С. 1025–1040. EDN VBERZN. doi:10.31857/S0016752520100039
14. *Redfield A. C.* On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton // *James Johnstone Memorial Volume / J. Johnstone, R. J. Daniel*. Liverpool : University Press of Liverpool, 1934. P. 176–192.
15. *Хоружий Д. С., Коновалов С. К.* Кремний в водах Севастопольской бухты весной 2008 года // *Морской гидрофизический журнал*. 2010. № 3. С. 40–51. EDN TMJWNJ.
16. *Вареник А. В., Козловская О. Н., Симонова Ю. В.* Оценка поступления биогенных элементов с атмосферными выпадениями в районе Южного берега Крыма (Кацивели) в 2010–2015 годах // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 5. С. 65–75. doi:10.22449/0233-7584-2016-5-65-75
17. *Iavorivska L., Boyer E. W., DeWalle D. R.* Atmospheric deposition of organic carbon via precipitation // *Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 146. P. 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.006>
18. *Вареник А. В.* Применение метода Брандона для оценки содержания неорганического азота в атмосферных осадках // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 5. С. 26–31. EDN LLDLGB.
19. *Brzezinski M. A.* The Si:C:N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environmental variables // *Journal of Phycology*. 1985. Vol. 21, iss. 3. P. 347–357. <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1985.00347.x>
20. *Демидов А. Б.* Сезонная изменчивость и оценка годовых величин первичной продукции фитопланктона в Черном море // *Океанология*. 2008. Т. 48, № 5. С. 718–733. EDN JSJSHX.

Поступила 20.12.2022 г.; одобрена после рецензирования 25.01.2023 г.; принята к публикации 01.02.2023 г.; опубликована 24.03.2023 г.

Об авторах:

Вареник Алла Валерьевна, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат географических наук, **ResearcherID: H-1880-2014**, *alla.varenik@mhi-ras.ru*

Мыслина Мария Андреевна, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0002-0054-0379**, *myslina@mhi-ras.ru*

Тарасевич Диана Вячеславовна, инженер-исследователь, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0003-4893-9685**, *ledi_di2020@bk.ru*

Заявленный вклад авторов:

Вареник Алла Валерьевна – общее научное руководство исследованием, формулировка целей и задач исследования, качественный и количественный анализ результатов и их интерпретация, обсуждение результатов работы, подготовка графических материалов, формулирование выводов

Мыслина Мария Андреевна – обзор литературы по проблеме исследования, качественный и количественный анализ результатов, их интерпретация

Тарасевич Диана Вячеславовна – обзор литературы по проблеме исследования, качественный и количественный анализ результатов, их интерпретация

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Гидролого-гидрохимический режим вод озера Донузлав (Западный Крым, Черное море) по результатам экспедиций 2019 года

В. И. Рябушко^{1*}, С. В. Щуров¹, Н. П. Ковригина¹,
А. И. Чепыженко²

¹ *Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия*

² *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*e-mail: rabushko2006@yandex.ru

Аннотация

Промышленная добыча песка и сброс сточных вод относятся к основным антропогенным факторам, влияющим на состояние экосистемы озера Донузлав (Крым, Черное море). Добыча песка, прежде всего, существенно меняет рельеф дна и может стать причиной возникновения зон с дефицитом кислорода. В связи с этим в районах мидийно-устричных ферм, зонах добычи песка, грузового порта, а также в районе влияния выпуска КОС «Донузлав» необходимо продолжение мониторинговых гидрохимических и гидробиологических работ в современных условиях. Цель настоящей работы – исследование гидролого-гидрохимической структуры юго-западного района озера Донузлав, подверженного антропогенному влиянию и включающего зону промышленной добычи песка. В апреле, мае и сентябре 2019 г. проведены исследования гидролого-гидрохимической структуры вод озера, включающие измерения температуры, солёности, а также определения содержания растворенного кислорода, биохимического потребления кислорода за пять суток (БПК₅), перманганатной окисляемости в щелочной среде, содержания кремния, минеральных и органических форм азота и фосфора. Показано, что распределение температуры и солёности воды отличается большой пространственной неоднородностью. Материалы гидрохимических исследований свидетельствуют о высокой концентрации кислорода в воде; случаев дефицита кислорода за период исследований не обнаружено. Минимальные концентрации растворенного кислорода не снижались до значений предельно допустимых концентраций (ПДК). Все значения БПК₅ не превышали ПДК. Локальное антропогенное воздействие на воды озера заключается в повышении концентраций биогенных веществ, органического азота и фосфора, а также значений окисляемости в районе добычи песка, вблизи выпуска сточных вод КОС «Донузлав» и в районе порта.

Ключевые слова: гидролого-гидрохимическая структура, биогенные элементы, озеро Донузлав, Крым, Черное море

© Рябушко В. И., Щуров С. В., Ковригина Н. П., Чепыженко А. И., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Благодарности: работа выполнена по темам государственных заданий: ФИЦ ИнБЮМ «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (номер гос. регистрации 121030300149-0) и ФГБУН ФИЦ МГИ «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (номер гос. регистрации 0555-2021-0005).

Для цитирования: Гидролого-гидрохимический режим озера Донузлав (Западный Крым, Черное море) по результатам экспедиций 2019 года / В. И. Рябушко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 91–103. EDN WWDOFG. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-91-103

Hydrological, Hydrochemical Conditions of Lake Donuzlav (Western Crimea, Black Sea) Based on the Results of Expeditions in 2019

**V. I. Ryabushko^{1*}, S. V. Shchurov¹, N. P. Kovrigina¹,
A. I. Chepyzhenko²**

¹ *A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia*

² *Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

**e-mail: rabushko2006@yandex.ru*

Abstract

Industrial sand extraction and wastewater discharge are among the main anthropogenic factors affecting the state of the ecosystem of Lake Donuzlav (Crimea, Black Sea). Sand mining primarily significantly changes the seabed and can cause the formation of an oxygen-deficient zone. In this regard, it is necessary to continue the up-to-date hydrochemical and hydrobiological monitoring in the areas of mussel-and-oyster farms, sand mining zones, cargo port, and in the area affected by the release of the Donuzlav sewerage treatment plant. The purpose of this work is to study the hydrological and hydrochemical structure of the southwestern region of Lake Donuzlav, which is subject to anthropogenic influence and includes a zone of industrial sand mining. In April, May and September 2019, studies of the hydrological and hydrochemical structure of lake waters were carried out, including measurements of temperature, salinity, content of dissolved oxygen, five-day biochemical oxygen demand (BOD₅), alkaline permanganate oxidizability, content of silicate, mineral and organic nitrogen and phosphorus. It is shown that the spatial distribution of water temperature and salinity is characterized by great heterogeneity and temporal variability. The hydrochemical studies indicate high oxygen supply in the lake; no cases of oxygen deficiency were detected during the research period. The minimum concentrations of dissolved oxygen did not drop to the minimum allowable levels. All BOD₅ values were below the maximum allowable levels. Local anthropogenic impact on the lake waters was registered in the increased concentrations of nutrients and oxidizability values in the sand mining areas, near the sewerage outlet, in the port area and in the area affected by the domestic wastewater release.

Keywords: hydrological and hydrochemical structure, biogenic elements, Lake Donuzlav, Crimea, Black Sea

Acknowledgements: The work was performed under state assignment of IBSS of RAS “Research of control mechanisms for production processes in biotechnological complexes with the aim of developing scientific foundations for obtaining biologically active substances and technical products of marine genesis”, state registration no. 121030300149-0; and of MHI RAS “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems”, state registration no. 08272019-0005.

For citation: Ryabushko, V.I., Shchurov, S.V., Kovrigina, N.P. and Chepyzhenko, A.I., 2023. Hydrological, Hydrochemical Conditions of Lake Donuzlav (Western Crimea, Black Sea) based on the Results of Expeditions in 2019. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 91–103. EDN WWDOFG. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-91-103

Введение

Озеро Донузлав является уникальным полузакрытым техногенным морским заливом, расположенным на западном побережье Крыма. До 1961 г. озеро не имело связи с морем и было вторым по площади соленым озером в Крыму с высокими значениями солености (90–95 ЕПС), однако и в настоящее время сохраняется его традиционное название «озеро». Наиболее ранние подробные сведения о сформировавшейся гидрохимической структуре озера Донузлав и поле течений в нем приведены в работах [1, 2]. Промышленная добыча песка в озере началась в 1962 г. и продолжается в настоящее время. Разным аспектам воздействия этой деятельности на экосистему залива был посвящен ряд работ [3–6]. Добыча песка, прежде всего, существенно меняет рельеф дна и может стать причиной возникновения зон с дефицитом кислорода.

Результаты исследований, выполненных в озере Донузлав за последние годы (2015–2021 гг.), нашли отражение в монографии «Современные гидрометеорологический и гидрохимический режимы залива Донузлав», 2021 г., где основное внимание уделено гидролого-гидрохимическому режиму и динамике вод [7]. Анализ материалов, полученных по результатам экспедиций в 2018 г. [8], дает представление о современном состоянии гидролого-гидрохимической структуры залива. В этих работах показана необходимость проведения регулярных мониторинговых наблюдений за экологическим состоянием озера для предотвращения возможных последствий ведения хозяйственной деятельности для промышленного и рекреационного потенциала озера.

Цель настоящей работы – исследование гидролого-гидрохимической структуры юго-западного района озера Донузлав, подверженного антропогенному влиянию и включающего зону современной промышленной добычи песка. Основное внимание уделено результатам экспедиций 2019 г., полученным в районах добычи песка, грузового порта, мидийно-устричной фермы, а также в районе влияния хозяйственно-бытовых вод КОС «Донузлав».

Материал и методы

Исследования юго-западной части озера Донузлав проводили в апреле, мае и сентябре 2019 г. Всего выполнено три съемки, пробы отбирали на 51 станции (рис. 1) в поверхностном слое и у дна с помощью батометра БМ-48М. Температуру воды в апреле измеряли с помощью глубоководного



Р и с . 1 . Схема отбора проб в озере Донузлав в 2019 г.: в апреле (зеленые квадраты), мае (голубые квадраты), сентябре (красные квадраты); I – мидийно-устричная ферма; II – сброс хозяйственно-бытовых вод; III – участок добычи песка; ВК – входной канал

F i g . 1 . Sampling scheme in Lake Donuzlav in 2019: April (green squares), May (blue squares), September (red squares); I – mussel-oyster farm; II – discharge of domestic water; III – sand production site; IC – input channel

опрокидывающегося термометра ТГ, а в мае и сентябре – при помощи оптического биофизического зондирующего комплекса «Кондор» (URL: <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multit>). Отобрано 79 проб воды, в которых определяли соленость (электросолемер ГМ-65), водородный показатель рН, содержание растворенного кислорода, биохимическое потребление кислорода за пять суток (БПК₅), перманганатную окисляемость в щелочной среде, содержание кремния, а также минеральных и органических форм азота и фосфора.

Анализ проб проводили согласно нормативным документам¹⁾. Концентрацию растворенного кислорода в морской воде определяли йодометрическим методом Винклера. Диапазон концентраций составляет от 0.1 мл/дм³ до состояния насыщения, показатель погрешности методики выполнения измерений (МВИ) – 3.4 %. Определение содержания растворенного неорганического фосфора проводилось по методу Морфи и Райли. Диапазон

¹⁾ РД 52.24.420-2019, РД 52.24.383-2018, РД 52.24.380-2017, РД52.24.381-2017, РД 52.24.382-2019, РД 52.24.432-2018, РД 52.10.805-2013, РД 52.24.387-2019.

определений: $5 \div 1000$ мкг/дм³, МВИ – 4.6 %. Определение растворенного неорганического кремния проводили колориметрически методом Королева. Диапазон определения: $10 \div 2000$ мкг/дм³, МВИ: $5.8 \div 4.7$ %. Нитритный азот определяли по методу, основанному на образовании азокраски, при взаимодействии нитрита с сульфаниламидом солянокислым и альфа-нафтилэтилен-диамином. Диапазон определения: $0.5 \div 100$ мкг/дм³, МВИ: $18.0 \div 1.5$ %. Определение нитратного азота проводили после его восстановления на кадмиевых колонках до нитритного азота. Диапазон определения составлял: $5 \div 500$ мкг/дм³ при МВИ: $7 \div 2.7$ %. Аммонийный азот определяли с помощью модифицированного метода Сэджи – Солорзано. Диапазон определения концентраций аммонийного азота: $15 \div 1500$ мкг/дм³, МВИ: $11.4 \div 1.7$ %.

Результаты и обсуждение

Съемка 8 апреля 2019 г. Добыча песка во время съемки не осуществлялась. По данным МГС Евпатория (URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Евпатории) температура воздуха в первой декаде апреля утром опускалась до 6 °С и повышалась до 21 °С днем. В период наблюдений преобладал ветер восточных, северо-восточных направлений со скоростью 2–5 м/с.

Температура и соленость. Температура воды в поверхностном слое характеризовалась незначительной пространственной изменчивостью, менялась в диапазоне 10.6–10.8 °С, и лишь к 15 часам в мелководном районе добычи песка вода прогревалась до 12.6 °С. Температура воды незначительно понижалась с глубиной. Так, на станциях вдоль фарватера на глубинах более 10 м значение температуры воды составляло 9.6–10.0 °С. Значения солености поверхностного слоя воды менялись от 17.85 ЕПС в районе фермы до 18.05 ЕПС в районах добычи песка и входного канала. С глубиной соленость менялась незначительно.

Гидрохимические показатели. Исследования показали высокую концентрацию кислорода во всем исследуемом слое (выше 100 % насыщения) и достаточно равномерное его распределение по горизонтали. Минимальное содержание кислорода (100.4 %), отмеченное в придонном слое, было более чем в 2.5 раза выше ПДК (40 %) по нормативам качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения²⁾. БПК₅ и окисляемость в поверхностном слое имели низкие значения, которые изменялись в пределах 0.91–1.36 мгО₂/дм³ и 2.56–3.53 мгО₂/дм³ и были ниже ПДК (2.0 мгО₂/дм³ и 4.0 мгО₂/дм³) соответственно. По значениям БПК₅ и окисляемости исследуемую акваторию можно охарактеризовать как незагрязненную.

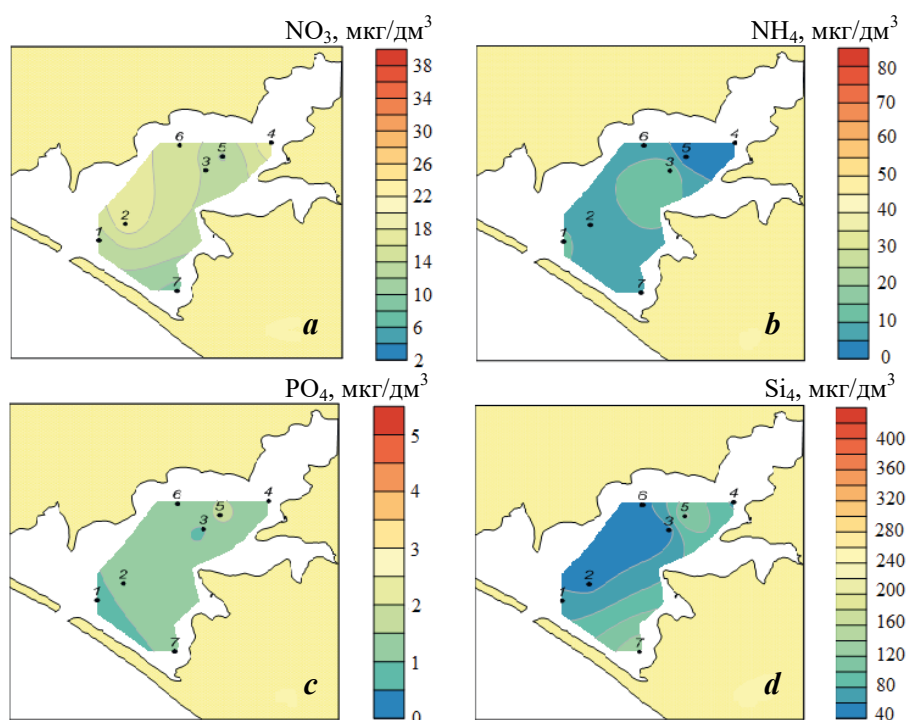
В районе добычи песка в придонном слое воды отмечено минимальное содержание кислорода и максимальное содержание органического фосфора и кремния. Концентрации минеральных форм азота и фосфора в поверхностном слое вод характеризовались следующими значениями: азот нитритный

²⁾ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 года № 552. URL: <http://agroportal2.garant.ru:81/document?id=71486774&byPara=1> (дата обращения: 11.03.2023).

и фосфор минеральный во всем слое не превышали ПДК (0.3–1.1 мкг/дм³ и 0.6–2.5 мкг/дм³). Концентрации азота нитратного изменялись от 9.2 и до 19.1 мкг/дм³, а азота аммонийного – от 0.6 и до 191.8 мкг/дм³. В районе расположения мидийно-устричной фермы отмечено снижение с глубиной значений концентрации нитратов и повышение концентраций азота аммонийного.

Распределение концентраций кремния, как и концентраций азота аммонийного, было неравномерным в поверхностном и придонном слоях (рис. 2). Пределы колебаний в поверхностном слое составляли 49.7–137.4 мкг/дм³, в придонном слое – от 38.4 до 130 мкг/дм³. Максимум концентрации кремния в придонном слое совпадал с максимальной концентрацией азота аммонийного (ст. 4), а максимальная концентрация кремния (137.4 мкг/дм³) в поверхностном слое отмечена в районе добычи песка.

Органические формы фосфора и азота определяли только в поверхностном слое воды, концентрации изменялись от 6.1 до 9.5 мкг/дм³ и от 875 до 1104 мкг/дм³ соответственно. На акватории фермы и в прилегающих к ней районах отмечено повышенное содержание азота органического, в районе добычи песка – максимальное содержание фосфора органического.



Р и с . 2 . Распределение концентраций биогенных элементов в поверхностном слое: нитратов (а), азота аммонийного, (b), фосфатов (c), кремния (d); апрель 2019 г. Цифрами обозначены станции

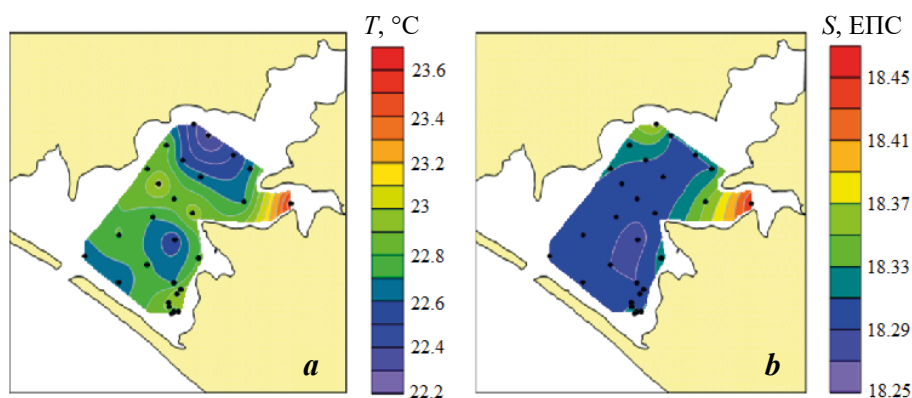
Fig. 2. Distribution of nutrient concentrations in the surface layer: nitrates (a), ammonium nitrogen (b), phosphates (c), silicon (d); April 2019. Numbers denote stations

Съемка 27 мая 2019 г. была проведена в период добычи песка. Съемке предшествовал (26 мая) ветер западного направления до 5–8 м/с (порывы до 10 м/с). Одновременно с отбором проб воды проведена съемка по учащенной схеме станций с помощью многопараметрического зонда-комплекса «КОНДОР». В результате съемки получены данные о температуре воды, а также параметры, характеризующие область распространения загрязнений. Это позволяло корректировать расположение точек отбора проб воды. Так, в районе добычи песка с глубинами менее 2 м, взмученная область была локализована и вытянута по ветру, ее горизонтальный масштаб – около 600 м [9].

Температура и соленость. В конце весеннего периода в озере происходил интенсивный прогрев вод и формирование термоклина. На мелководных участках исследуемой акватории глубиной до 4 м (в том числе и в районе добычи песка) стратификация температуры отсутствовала (рис. 3). Толща вод была однородной и прогретой до 22.9–23.3 °С. На станциях с глубинами более 8 м распределение температуры характеризовалось наличием верхнего квазиоднородного слоя толщиной 4–8 м с температурой 22.3–22.7 °С и слоя скачка толщиной 3–5 м с максимальным вертикальным градиентом 0.6 °С/м. Под слоем скачка на глубине 12–16 м температура была минимальной: 18.8–19.5 °С (рис. 4).

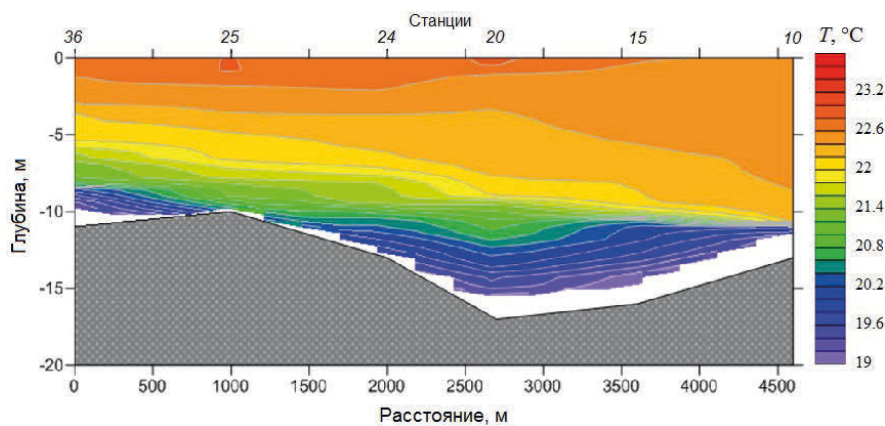
Соленость поверхностного слоя менялась в диапазоне 18.29–18.45 ЕПС, повышаясь в северо-восточном направлении и достигая максимума в мелководной бухте Щелкунова. На глубинах свыше 10 м на фарватере вертикальный градиент солености был незначительным и максимальные значения солености не превышали 18.32 ЕПС.

Гидрохимические показатели. Содержание *растворенного кислорода* характеризовалось высокими значениями. Так, в поверхностном слое его содержание доходило до 121.7 % насыщения при среднем значении, равном 109.7 %. В придонном слое насыщение кислородом было несколько ниже: среднее значение составляло 103.2 %, минимальное – 95.7 % (вблизи входного



Р и с . 3. Распределение температуры (a) и солености (b) в поверхностном слое; май 2019 г. Точки – станции измерений

Fig. 3. Distribution of temperature (a) and salinity (b) in the surface layer, May 2019. Points are station locations



Р и с 4. Распределение температуры на разрезе вдоль фарватера; май 2019 г.

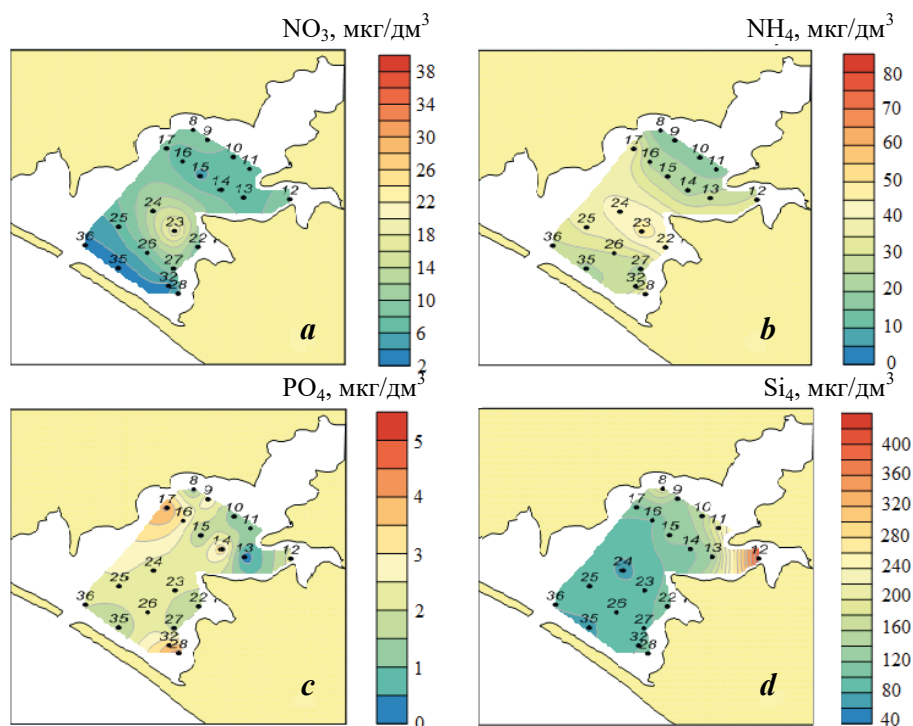
Fig. 4. Temperature distribution at the channel transect; May 2019

канала). Кроме того, на ст. 10 и 15, расположенных по фарватеру, в придонном слое процент насыщения кислородом составлял 97.8 и 97.5 %.

БПК₅ имели низкие значения и характеризовались незначительной пространственной изменчивостью: они не превышали ПДК по рыбохозяйственным нормативам и изменялись в пределах от 1.12 до 1.97 мгО₂/дм³ при среднем для акватории значении, равном 1.54 мгО₂/дм³. Значения окисляемости, как и значения БПК₅, не превышали ПДК. Исключение составил только район добычи песка, где значение окисляемости равнялось 4.24 мгО/дм³ и превышало соответствующую ПДК на 0.24 мгО/дм³. В целом низкие значения БПК₅ и окисляемости, полученные во время съемки в мае, указывают на незначительную загрязненность исследованного района.

Концентрации минеральных форм азота и фосфора имели низкие значения и были равномерно распределены по акватории. Концентрации азота нитратного в поверхностном слое изменялись от 2.7 до 20.0 мкг/дм³ и азота аммонийного – от 8.9 до 48.4 мкг/дм³ при средних значениях, равных соответственно 8.1 и 26.2 мкг/дм³. Максимальные концентрации азота нитратного и аммонийного отмечены в районе добычи песка. Концентрации минерального фосфора, как и минерального азота, имели низкие значения (от 0.1 до 5.4 мкг/дм³) при среднем значении для поверхностного слоя, равном 2.2 мкг/дм³. Максимальное значение отмечено в районах устричной фермы и добычи песка.

Распределение концентраций минеральных форм азота, фосфора и кремния в поверхностном слое озера представлено на рис. 5. Концентрации фосфатов в мае превышали апрельские значения почти в два раза. Концентрации минеральных форм азота в поверхностном слое озера Донузлав в 2019 и 2018 гг. не различались. Распределение значений концентраций кремния во время съемки было неравномерным, пределы его колебаний в поверхностном слое составляли 44.1–409.8 мкг/дм³ при среднем значении, равном 111.3 мкг/дм³. Максимальное количество кремния обнаружено в районе влияния хозяйственно-бытового стока. Средние концентрации кремния в мае были почти в 1.5 раза выше апрельских. Значения концентраций органических форм



Р и с . 5 . Распределение концентраций биогенных элементов в поверхностном слое: нитратов (а), азота аммонийного (b), фосфатов (с), кремния (d); май 2019 г. Цифрами обозначены станции

F i g . 5 . Distribution of concentrations of biogenic elements in the surface layer: nitrates (a), ammonium nitrogen (b), phosphates (c), silicon (d); May 2019. Numbers denote stations

азота и фосфора изменялись в поверхностном слое от 643 до 1426 мкг дм³ и от 11.4 до 20.1 мкг/дм³. В районе добычи песка наблюдали повышение содержания органических форм и азота, и фосфора.

Перманганатный метод определения окисляемости позволяет косвенно получить ориентировочную оценку содержания в воде растворенного органического вещества. Значение 0.34, по Скопинцеву³⁾, складывается из отношения кислорода окисляемости в слое 0–50 м (1.22 мг/дм³) к органическому углероду (3.6 мг/дм³). В среднем для слоя 0–50 м отношение равно 0.34. Используя значения полученной нами перманганатной окисляемости и коэффициента 0.34, мы рассчитали содержание растворенного органического углерода ($C_{\text{ров}}$) в поверхностном слое. Диапазон изменений $C_{\text{ров}}$ составил 8.09–12.47 мгС/дм³. Максимум зафиксирован в районе добычи песка (ст. 28), минимум – в районе мидийно-устричной фермы.

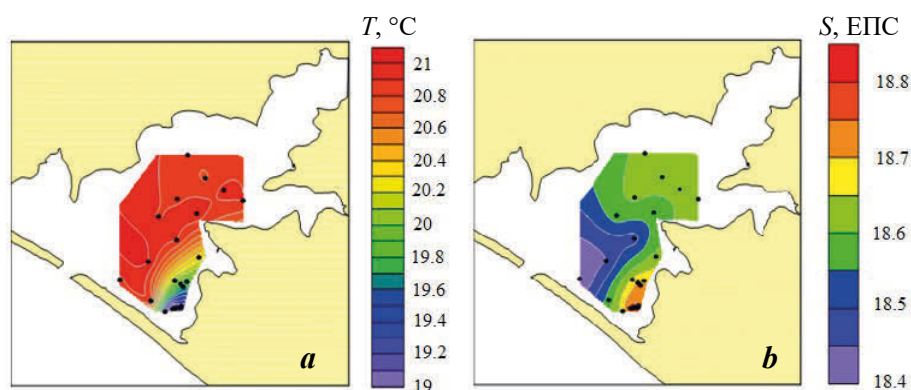
³⁾ Скопинцев Б. А. Формирование современного химического состава вод Черного моря. Ленинград : Гидрометеиздат, 1975. 335 с.

Съемка 16 сентября 2019 г. По данным МГС Евпатория, температура воздуха 15–16 сентября изменялась от 13 до 23.8 °С. 15 сентября преобладал ветер северо-восточных направлений со скоростью 3–6 м/с, а в день работ поменялся на западный, юго-западный, скорость ветра составляла 3–5 м/с. Объемы добычи песка в этот день были снижены, сброс возвратных вод происходил непостоянно и с разной интенсивностью. Поэтому размеры области повышенной концентрации взвешенных веществ были менее значимы, чем 27 мая 2019 г. Пятно взвеси было вытянутым вдоль берега на северо-восток.

Температура и соленость. В сентябре начинается осеннее выхолаживание вод и выравнивание температуры по всей толще воды. Так, 15–16 сентября температура воздуха ночью опускалась до 13 °С, а днем повышалась до 24 °С. Локальный минимум температуры (19 °С) отмечен в районе добычи песка, на большей же части района исследований температура была около 21 °С (рис. 6). До глубины 17 м температура воды была почти однородной. Соленость менялась в диапазоне 18.4–18.8 ЕПС, повышаясь от входного канала к средней части озера. Максимальные значения солености (18.8 ЕПС) зафиксированы в мелководном районе добычи песка.

Гидрохимические показатели. Распределение кислорода на акватории в позднелетний сезон было достаточно равномерным. Его содержание в поверхностном слое воды изменялось от 89.9 до 108.7 % насыщения, а в придонном слое – от 89.9 до 108.7 %. Минимальные значения отмечены на границе района добычи песка с прилегающей акваторией; максимальные значения зафиксированы в районе фарватера.

Значения БПК₅ изменялись в поверхностном слое от 0.73 до 1.95 мг/дм³ и не превышали ПДК. Максимальное значение БПК₅ отмечено в районе добычи песка. Окисляемость изменялась от 3.29 до 5.37 мгО/дм³. Минимальное значение наблюдали в районе порта на глубине 9 м, а максимальное, превышающее ПДК на 1.37 мгО/дм³, – в поверхностном слое той же станции. В районе добычи песка значения окисляемости превышали ПДК в результате влияния сброса возвратных вод.

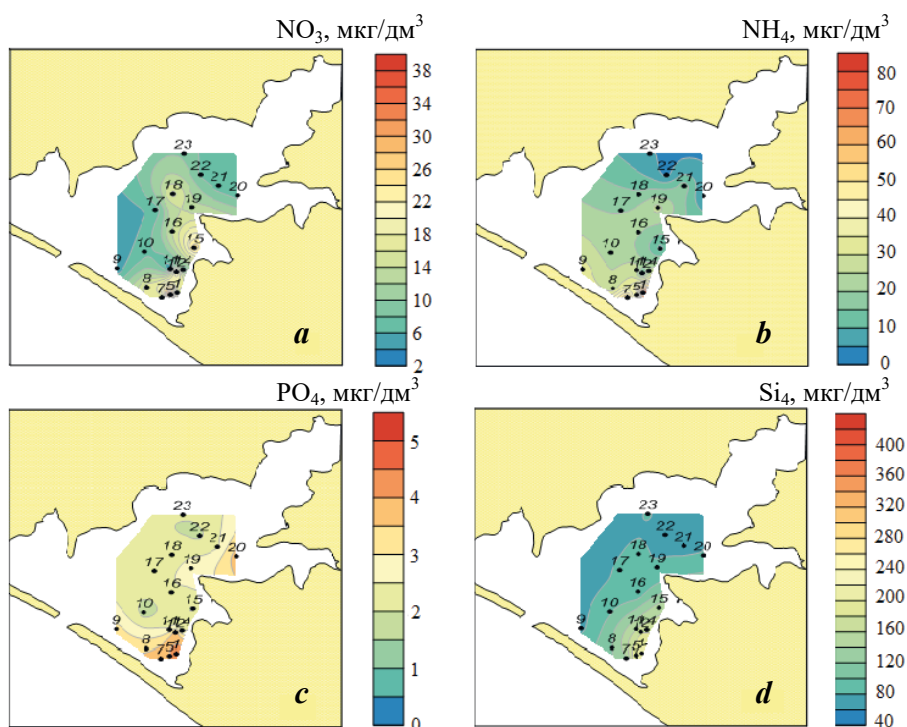


Р и с . 6 . Распределение температуры (a) и солености (b) в поверхностном слое; сентябрь 2019 г. Точки – станции измерений

Fig . 6 . Distribution of temperature (a) and salinity (b) in the surface layer September 2019. Points are station locations

Рассчитанное по окисляемости содержание $C_{\text{ров}}$ изменялось во время съемки от 9.68 до 15.79 мгС/дм³ и приближалось к диапазонам изменчивости значений $C_{\text{ров}}$, полученных в мае (8.09–12.47 мгС/дм³) на акватории озера Донузлав.

Концентрации азота нитритного и фосфора минерального, как и в предыдущей съемке, имели низкие значения и равномерное распределение по площади (рис. 7). Концентрации азота нитритного в поверхностном и придонном слоях изменялись от 0.2 до 1.2 мкг/дм³, фосфора минерального – от 1.5 до 4.6 мкг/дм³. Распределение концентраций азота нитратного, азота аммонийного, а также кремния было неравномерно по площади и по вертикали. Максимальные значения концентрации нитратов (38.0 мкг/дм³) в поверхностном и придонных слоях (42.4 мкг/дм³) зафиксированы в районах порта и добычи песка. Концентрации азота нитратного на остальных станциях распределены достаточно равномерно, их средние значения составляли 13.4 мкг/дм³ в поверхностном и 12.6 мкг/дм³ в придонном слое. Концентрации азота аммонийного в поверхностном слое изменялись от 3.2 мкг/дм³ до 78.8 мкг/дм³ при среднем значении, равном 24.5 мкг/дм³. Максимальное значение концентрации азота аммонийного отмечено в поверхностном слое района добычи песка.



Р и с . 7 . Распределение концентраций биогенных элементов в поверхностном слое: нитратов (а), азота аммонийного (b), фосфатов (c), кремния (d); сентябрь 2019 г. Цифрами обозначены станции

F i g . 7 . Distribution of concentrations of biogenic elements in the surface layer: nitrates (a), ammonium nitrogen (b), phosphates (c), silicon (d); September 2019. Numbers denote stations

Распределение концентраций кремния в поверхностном слое изменялось от 73.3 до 211.5 мкг/дм³ при среднем значении, равном 119.7 мкг/дм³. Повышенные значения отмечены как в районе добычи песка (ст. 1, 5–8), так и в пятне взвеси, которое наблюдали до ст. 11–15. На остальной акватории зафиксированы низкие концентрации кремния.

Концентрации органического азота и органического фосфора на акватории распределялись следующим образом: в районах влияния сброса хозяйственно-бытовых вод КОС и добычи песка отмечены повышенные (от 1033 до 1297 мкг/дм³) концентрации органического азота. На остальной акватории значения были существенно ниже и изменялись от 703 до 885 мкг/дм³. Распределение концентраций фосфора органического было аналогично распределению концентраций азота органического: повышенные значения (от 18.6 до 30.9 мкг/дм³) наблюдали в тех же районах, где отмечено повышение содержания азота органического, а пониженные (от 17.6 до 26.9 мкг/дм³) – там, где наблюдали уменьшение содержания азота органического.

Заключение

Пространственное распределение термохалинных характеристик вод озера Донузлав отличается большой неоднородностью. Весной в озере происходит интенсивный прогрев воды и формирование термической стратификации. Во второй половине сентября начинается осеннее выхолаживание вод и вертикальное распределение температуры характеризуется однородностью по всей толще воды. Проведенные гидрохимические исследования свидетельствуют о высокой концентрации кислорода в водах озера. Минимальные концентрации растворенного кислорода не снижались до значений ПДК. Случаев дефицита кислорода за период исследований не обнаружено. Все значения БПК₅ были ниже ПДК. Антропогенное воздействие на озеро Донузлав в районах добычи песка, расположения порта и выпуска хозяйственно-бытовых сточных вод заключается в локальном повышении окисляемости и концентрации биогенных веществ, а также органического фосфора и азота. Максимальные значения концентраций минеральных и органических форм азота и фосфора отмечены в районе добычи песка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Немировский М. С., Ковригина Н. П.* Динамика вод озера Донузлав // *Экология моря*. 2000. Т. 51. С. 10–13. EDN UCAESN.
2. *Ковригина Н. П., Немировский М. С.* Гидрохимическая характеристика вод озера Донузлав по данным 1990–1997 гг. // *Экология моря*. 1999. Т. 48. С. 10–14. EDN XWPTJB.
3. *Зув Г. В., Болтачев А. Р.* Влияние подводной добычи песка на экосистему лимана Донузлав // *Экология моря*. 1999. Т. 48. С. 5–9. EDN XWPTIR.
4. Влияние промышленной разработки месторождений песка на состояние экосистемы оз. Донузлав / Л. К Себах [и др.] // *Современные проблемы экологии Азово-Черноморского бассейна : материалы II международной конференции*. Керчь, 26–27 июня 2006 г. Керчь : ЮгНИРО, 2006. С. 71–79. URL: <https://aquadocs.org/handle/1834/9450> (дата обращения: 12.02.2023).
5. Состояние качества водной среды и донных отложений озера Донузлав в современный период / С. С. Жугайло [и др.] // *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2018. Т. 1, № 1. С. 32–38. EDN VTMJOO. doi:10.47921/2619-1024_2018_1_1_32

6. *Иванютин Н. М.* Современное экологическое состояние озера Донузлав // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 3(79). С. 47–58. EDN FWRWYI. doi:10.23968/2305-3488.2019.24.3.47-58
7. Современные гидрологический и гидрохимический режимы залива Донузлав / под ред. Н. Н. Дьякова, В. В. Фомина. Севастополь, 2021. 464 с. EDN SYFWYC.
8. Гидролого-гидрохимические и гидробиологические исследования озера Донузлав (Западный Крым, Черное море) по результатам экспедиций 2018 года / В. И. Рябушко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 80–93. EDN NNRDGA. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-80-93
9. Контроль системы течений и полей концентрации общего взвешенного и растворенного органического веществ в озере Донузлав в мае 2019 года / П. Д. Ломакин [и др.] // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 1. С. 87–94. EDN CTALSR. doi:10.33075/2220-5861-2021-1-87-94

Поступила 20.07.2022 г.; одобрена после рецензирования 10.10.2023 г.; принята к публикации 01.02.2023 г.; опубликована 24.03.2023 г.

Об авторах:

Рябушко Виталий Иванович, главный научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), доктор биологических наук, **ORCID ID: 0000-0001-5052-2024**, **Scopus Author ID: 7801673501**, **ResearcherID: H-4163-2014**, *rabushko2006@yandex.ru*

Щуров Сергей Вячеславович, научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), **ORCID ID: 0000-0002-8913-2637**, **Scopus Author ID: 57214992790**, **ResearcherID: AAC-9044-2022**, *skrimea@mail.ru*

Ковригина Неля Петровна, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-6734-8285**, **Scopus Author ID: 6507114864**, *maricultura@mail.ru*

Чепыженко Алексей Ильич, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат технических наук, **ResearcherID: AAG-7929-2020**, **Scopus Author ID: 6504344211**, **IstinaResearcherID (IRID): 6647872**, *ecodevice@yandex.ru*

Заявленный вклад авторов:

Рябушко Виталий Иванович – постановка цели и задач комплексного исследования, редактирование рукописи

Щуров Сергей Вячеславович – организация и руководство экспедицией, гидрологические работы

Ковригина Неля Петровна – гидрохимические работы

Чепыженко Алексей Ильич – комплекс гидрофизических исследований

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поле концентрации окрашенного растворенного органического вещества и его связь с соленостью в открытых водах Азовского моря

П. Д. Ломакин *, Д. Д. Завьялов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: p_lomakin@mail.ru

Аннотация

На основе материалов серии экспедиций, проведенных Морским гидрофизическим институтом (г. Севастополь) и Южным научно-исследовательским институтом морского рыбного хозяйства и океанографии (г. Керчь) в 2002–2013 гг., получено уравнение регрессии, свидетельствующее о наличии достаточно тесной обратной корреляционной связи между соленостью и концентрацией окрашенного растворенного органического вещества в открытых водах Азовского моря. Показано, что теснота корреляционной зависимости между этими величинами существенным образом зависит от наличия в водах рассматриваемого региона растворенной органики антропогенного происхождения. При помощи данного уравнения по известным полям средней месячной солености рассчитаны поля концентрации окрашенного растворенного органического вещества, проанализирована их структура и внутригодовая изменчивость. Выявлено, что поле исследуемого вещества характеризуется низкой концентрацией и однородностью. В открытой акватории моря вариации солености, определяемые внутригодовым ходом объема стока рек Дон и Кубань, не оказывают существенного влияния на пространственно-временную изменчивость поля окрашенного растворенного органического вещества. Показано, что тесная обратная корреляционная связь между содержанием окрашенного растворенного органического вещества и соленостью – индикатор хорошего качества вод. Слабая или положительная корреляционная зависимость между этими величинами – признак наличия в водной среде растворенных органических веществ антропогенной природы.

Ключевые слова: окрашенное растворенное органическое вещество, соленость, корреляция, загрязнение, Азовское море

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

Для цитирования: Ломакин П. Д., Завьялов Д. Д. Поле концентрации окрашенного растворенного органического вещества и его связь с соленостью в открытых водах Азовского моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 104–112. EDN XDLBGE. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-104-112

© Ломакин П. Д., Завьялов Д. Д., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

The Field of Colored Dissolved Organic Matter Content and its Relationship with Salinity in the Open Water of the Sea of Azov

P. D. Lomakin *, D. D. Zavyalov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

*e-mail: p_lomakin@mail.ru

Abstract

Based on the materials of a series of expeditions carried out by Marine Hydrophysical Institute (Sevastopol) and Southern Scientific Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (Kerch) during 2002–2013, a regression equation was obtained indicating the presence of a fairly close inverse correlation relationship between salinity and the concentration of colored dissolved organic matter in the open waters of the Sea of Azov. It is shown that the closeness of the correlation dependence between these values depends significantly on the presence of dissolved organic matter of anthropogenic origin in the waters of the studied region. Using this equation, according to the known average monthly salinity fields, the concentration fields of colored dissolved organic matter were calculated and the regularities of their structure and intra-annual variability were analyzed. It is found that the field of the studied matter is characterized by low concentration and relative homogeneity. In the open water area of the sea, salinity variations determined by the intra-annual variation in the runoff volume of the Don and Kuban Rivers do not significantly affect the spatiotemporal variability in the field of colored dissolved organic matter. It is shown that a close inverse correlation between the content of colored dissolved organic matter and salinity is an indicator of the good quality of water. A weak or positive correlation between these quantities is a sign of the presence of dissolved organic substances of anthropogenic nature in the aquatic environment.

Keywords: colored dissolved organic matter, salinity, correlation, pollution, Sea of Azov

Acknowledgements: The work was performed under state assignment no 0555-2021-0005 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems”.

For citation: Lomakin, P.D. and Zavyalov, D.D., 2023. The Field of Colored Dissolved Organic Matter Content and its Relationship with Salinity in the Open Water of the Sea of Azov. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 104–112. EDN XDLBGE. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-104-112

Введение

Содержание растворенного органического углерода (*dissolved organic carbon, DOC*) и окрашенного растворенного органического вещества (*colored dissolved organic matter, fDOM*) относят к основным репрезентативным показателям содержания растворенного органического вещества в морской воде [1]. На шельфе океанов и морей, распресненных речными водами, в районах стоковых фронтов и фронтальных зон поля концентрации каждого из этих показателей связаны с соленостью тесной обратной корреляционной зависимостью с коэффициентом корреляции до -0.95 [2, 3]. Эта связь обусловлена высокой концентрацией растворенного органического вещества терригенного происхождения в прибрежных распресненных материковым стоком водах.

Содержание данного вещества скачкообразно уменьшается в речных устьях на естественном маргинальном фильтре и далее заметно падает на мористой границе стоковых фронтальных зон [4, 5].

За пределами прибрежных стоковых фронтальных зон в открытых водах океанов и морей подобные связи и их свойства менее изучены. Так, в статье [6] в открытой части Черного моря в вертикальной структуре вод обнаружена обратная зависимость концентрации растворенного органического углерода от солёности – $DOC(S)$. Данная связь, проанализированная на качественном уровне авторами цитируемой работы, была использована ими для интерпретации биохимических процессов в глубоководной зоне моря.

Отметим, что связи между показателями содержания растворенного органического вещества и солёностью важны и полезны в ряде прикладных и теоретических направлениях океанологии. Они позволяют, например, получить представление о структуре малоизученного поля содержания растворенного органического вещества на основе массивов солёности, отследить траектории распространения речных вод на шельфах и за их пределами.

Цели настоящей статьи:

- получить уравнение корреляционной зависимости концентрации $fDOM$ от солёности в водах Азовского моря, которые расположены за пределами основных стоковых фронтальных зон и не подвержены непосредственному влиянию речного стока;

- на основе этого уравнения и известных средних месячных полей солёности рассчитать поля содержания рассматриваемой величины, выявить особенности их структуры и внутригодовой изменчивости;

- оценить влияние антропогенной составляющей поля содержания $fDOM$ на тесноту корреляционной зависимости концентрации этого вещества от солёности.

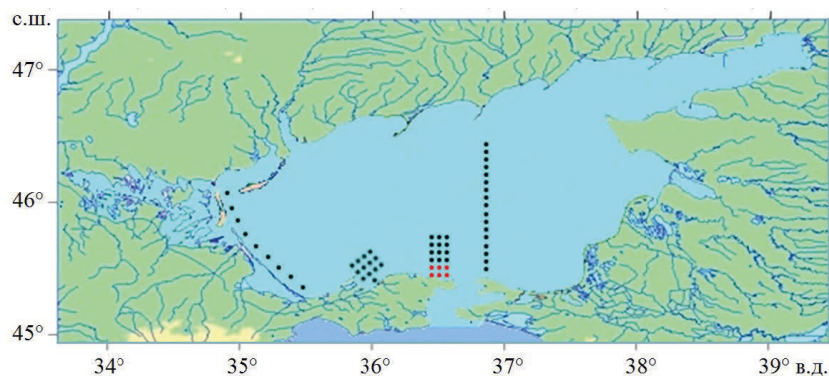
Исходные данные и методы исследования.

Рассматриваемая акватория – часть моря, характеризующаяся максимальной солёностью и включающая открытые воды, а также воды западной и южной прибрежных областей, где средняя месячная солёность более 10 ЕПС. Согласно атласу¹⁾, изохалина 10 представляет собой мористую границу прибрежных стоковых халинных зон, наблюдаемых вдоль северного и восточного берегов Азовского моря и в Таганрогском заливе.

Исследуемая величина – оптический показатель содержания растворенного органического вещества, $fDOM$. Ее размерность представлена в оптических единицах калибровки – сульфат хинина (*quinine sulfate unit, QSU*) [7].

Используемый для анализа эмпирический материал – выборка инструментальных синхронных наблюдений за солёностью и концентрацией $fDOM$ (всего 54 зондирования). Они были выполнены в ряде экспедиций Морского гидрофизического института (г. Севастополь) и Южного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии (г. Керчь)

¹⁾ *Climatic Atlas of the Sea of Azov 2006*. NOAA National centers for environmental information. International Ocean Atlas and Informational Series, Vol. 10. Available at: <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/AZOV2006/start.html> [date of access: 12.03.2023].



Р и с . 1 . Расположение станций с синхронной фиксацией концентрации *fDOM* и солёности (2002–2013 гг.)

Fig. 1. Map of stations with simultaneous registration of *fDOM* concentration and salinity (2002–2013)

за временной интервал с 2002 по 2013 г. Наблюдения охватывали центральную, западную, юго-западную части моря и район керченского предпроливья (рис. 1).

Все анализируемые данные получены при помощи портативного оптического зондирующего комплекса «Кондор» (URL: ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor). На каждом зондировании с шагом по глубине 0.1 м солёность и концентрация *fDOM* фиксировались синхронно *in situ*. Погрешность измерений солёности – ± 0.01 ЕПС. Погрешность измерений содержания *fDOM*, – ± 0.2 *QSU*. Диапазон исследованных глубин 1.5–10.5 м.

Зависимость между солёностью и концентрацией *fDOM* рассчитана методом парной корреляции. При помощи полученного уравнения регрессии средние месячные климатические поля солёности для рассматриваемой акватории Азовского моря¹⁾, которые построены по хорошо обеспеченным выборкам фактических данных, были оцифрованы, а затем пересчитаны в поля концентрации исследуемой величины.

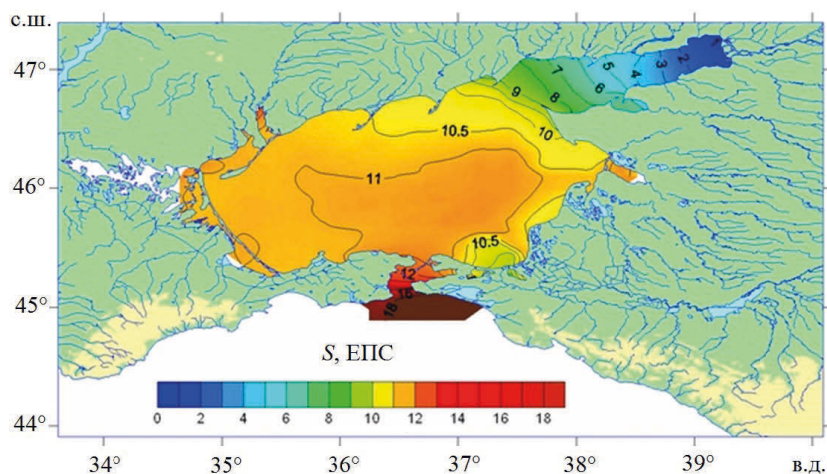
В качестве примера на рис. 2 показано среднее месячное поле солёности для июня.

Обсуждение результатов

На рис. 3, *a* в системе координат *S*, *fDOM* показана исходная выборка данных и график корреляционной связи между анализируемыми величинами, откуда следует, что они независимы (коэффициент корреляции $R = -0.14$).

В правом верхнем углу координатной плоскости расположено обособленное облако точек, которые явно не вписываются в основное поле, иллюстрирующее тенденцию падения концентрации *fDOM* с ростом солёности.

Выяснилось, что особые точки (всего их шесть), отличавшиеся максимальной концентрацией *fDOM* (45–61 *QSU*) и высокой солёностью (12.9–13.3 ЕПС) (на рис. 3, *a* они обведены), соответствовали станциям, находившимся в районе выпуска сточных вод Бондаренковских очистных сооружений г. Керчи (точки красного цвета на рис. 1). Эти данные характеризовали загрязнённые канализационным стоком прибрежные воды и были исключены из исходной выборки.

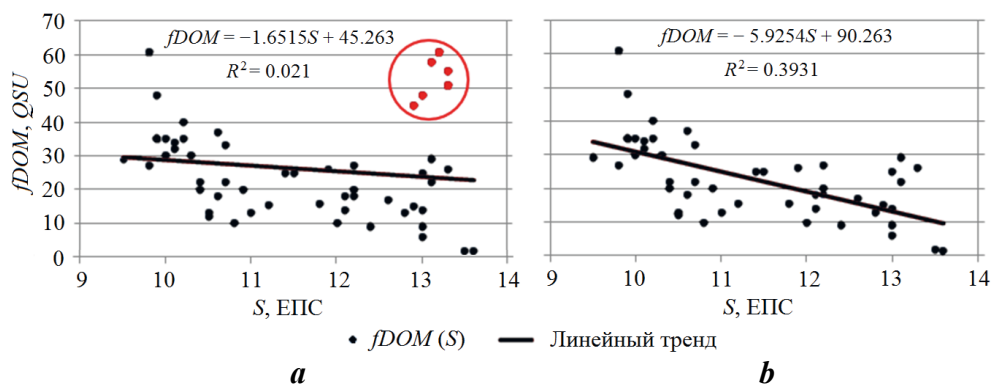


Р и с . 2. Средняя месячная солёность в поверхностном слое (0 м) Азовского моря в июне ¹⁾

Fig. 2. Average monthly salinity in the surface layer (0 m) of the Sea of Azov in June ¹⁾

По отфильтрованной выборке между исследуемыми величинами обнаружена типичная обратная и достаточно тесная корреляционная связь, коэффициент корреляции $R = -0.63$ (уравнение регрессии $fDOM = -5.92 \cdot S + 90.26$; $N = 48$, рис. 3, *b*).

Представленный на рис. 3 результат указывает на следующее. Зависимость $fDOM(S)$ реагирует на присутствие в исследуемых водах растворенного органического вещества антропогенного происхождения и представляет собой хороший показатель загрязнения водной среды этим веществом. Тесная обратная корреляционная зависимость $fDOM(S)$ и, соответственно, достаточно высокий (по модулю) коэффициент корреляции – показатели хорошего качества вод.



Р и с . 3. Графики корреляционной зависимости $fDOM(S)$ для рассматриваемой акватории Азовского моря: *a* – исходная выборка; *b* – отфильтрованная выборка

Fig. 3. $fDOM(S)$ correlation dependence charts for the studied water area of the Sea of Azov: *a* – original sample; *b* – filtered sample

Слабая отрицательная или положительная корреляционная зависимость между анализируемыми величинами – признак наличия в водной среде растворенных органических веществ антропогенной природы.

Рассмотрим факторы, обуславливающие особенности структуры и временную изменчивость солёности и $fDOM$ в Азовском море.

Основной фактор, определяющий солёностный режим преобладающей части акватории моря и, соответственно, структуру и внутригодовую изменчивость полей солёности и концентрации $fDOM$, связан с объемом стока р. Дон. Максимальный сток этой реки наблюдается в мае. В остальные месяцы года для гидрологического режима Дона типична маловодная межень²⁾.

В восточной прибрежной области Азовского моря поле солёности¹⁾ определяется стоком р. Кубани, который достигает максимальных значений в летние месяцы во время интенсивных паводков вследствие таяния снега в горах Кавказа [8].

Соответственно, максимальное распреснение преобладающей части акватории моря, характеризуемое средней месячной солёностью 11–11.5 ЕПС в центральной части, наблюдается в мае и июне (рис. 2). В остальные месяцы года солёность вод исследуемой акватории 11.5–12.5 ЕПС¹⁾ и незначительно изменяется во времени [8].

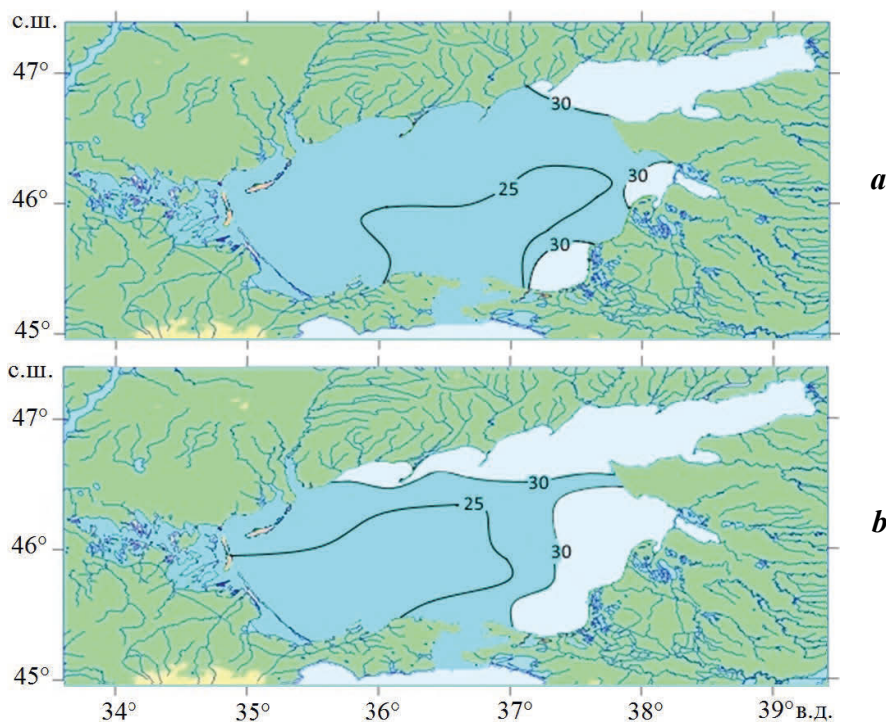
В рассматриваемой области моря средние месячные поля солёности в поверхностном слое однородны. Перепад солёности на границах – 1.5–2.5 ЕПС. Также небольшим интервалом 0.5–0.7 ЕПС оценивается размах внутри годового хода средней месячной солёности.

Для иллюстрации особенностей структуры и внутригодовой изменчивости характеристик поля исследуемой величины на рис. 4 изображены распределения содержания $fDOM$, рассчитанные нами на основе полученного уравнения регрессии $fDOM(S)$ и средних месячных полей солёности¹⁾ для марта и июня.

Видно, что в месяцы, относящиеся к крайним фазам внутригодовых вариаций стока р. Дон, определяющим максимальный размах внутригодовых колебаний солёности вод в Азовском море, структура поля содержания $fDOM$ рассматриваемой акватории изменяется незначительно. Оно однородно. Концентрация анализируемого вещества почти не подвержена внутригодовым вариациям, она минимальна на всей акватории моря и изменяется в интервале 25–30 QSU . Согласно [9], концентрация $fDOM$ в водах Таганрогского залива, в северной и восточной распресненных прибрежных областях Азовского моря максимальна и изменяется в интервале 30–300 QSU .

Существенные изменения в течение года претерпевает площадь ареала минимальной концентрации рассматриваемой величины. В июле – марте, в межень Дона и Кубани, в условиях минимального распреснения моря она наибольшая и равна 70–80 % от площади всей акватории моря (рис. 4, а). В мае – июне во время паводков на Дону и Кубани площадь, занимаемая водами с минимальным содержанием $fDOM$, наименьшая – 50–60 % от площади всей акватории Азовского моря (рис. 4, б).

²⁾ Родионов Н. А. Гидрология устьевой области Дона. Ленинград : Гидрометеониздат, 1958. 95 с.



Р и с . 4 . Концентрация $fDOM$, QSU , на поверхности в открытой части Азовского моря в марте (а) и в июне (b)

F i g . 4 . Concentration of $fDOM$, QSU , at the surface in the open part of the Sea of Azov in March (a) and June (b)

Стабильность структуры поля $fDOM$ и значительные внутригодовые колебания площади распространения вод максимальной солености можно объяснить следующим образом. Согласно классическим представлениям К. Н. Федорова [5], на мористой границе стоковых фронтальных зон происходит скачкообразное изменение свойств распресненных вод. Влияние этих вод становится малозначимым и исчезает в открытом море.

Резко возрастающий сток Дона и Кубани сопровождается распреснением прибрежных вод и поступлением большого количества $fDOM$, которое в основном сосредоточено в пределах стоковой фронтальной зоны. В открытую часть моря проникает небольшая доля этого вещества. Во время паводка площадь стоковой зоны увеличивается, соответственно, сокращается площадь Азовского моря с максимальной соленостью.

Заклучение

На основе материалов серии экспедиций, проведенных в 2002–2013 гг., выявлена достаточно тесная обратная корреляционная зависимость между соленостью и концентрацией $fDOM$ (коэффициент $R = -0.63$) в открытых водах Азовского моря и на акватории, примыкающей к его западному и южному берегам.

Установлено, что корреляционная связь $fDOM(S)$ реагирует на присутствие в исследуемых водах растворенного органического вещества антропогенного

происхождения и представляет собой хороший показатель загрязнения водной среды этим веществом. Тесная обратная корреляционная зависимость $fDOM(S)$ – индикатор хорошего качества вод. Слабая или положительная корреляционная зависимость между рассмотренными величинами – признак наличия растворенных органических веществ антропогенной природы.

При помощи полученного уравнения регрессии по картам средней месячной солености рассчитаны и построены поля содержания $fDOM$.

Показано, что в водах осолоненной части Азовского моря, вследствие незначительной пространственно-временной изменчивости солености, средние месячные поля $fDOM$ однородны и мало изменяются во времени. Они характеризуются небольшой концентрацией 25–30 QSU и почти не реагируют на распреснение моря, обусловленное внутрigoдовым ходом объема стока рек Дон и Кубань. Во время паводков на этих реках в мае – июне площадь акватории с низким содержанием $fDOM$ минимальна и занимает 50–60 % от всей площади Азовского моря. В остальное время года в период маловодной межени на Дону и Кубани она увеличивается до 70–80 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агатова А. И., Лапина Н. М., Торгунова Н. И. Особенности распределения органического вещества в водах Черного моря // Система Черного моря. Москва : Научный мир, 2018. С. 146–170. doi:10.29006/978-5-91522-473-4.2018
2. Пугач С. П., Пинко И. И. Динамика растворенного окрашенного органического вещества на шельфе Восточносибирского моря // Доклады академии наук. 2012. Т. 447, № 6. С. 671–674. EDN PNSDQJ.
3. Development of under-ice stratification in Himmerfjärden bay, North-Western Baltic proper, and their effect on the phytoplankton spring bloom / E. Kari [et al.] // Journal of Marine Systems. 2018. Vol. 186. P. 85–95. doi:10.1016/j.jmarsys.2018.06.004
4. Лисицын А. П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34, № 5. С. 735–747.
5. Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
6. Organic matter along longitudinal and vertical gradients in the Black Sea / D. Kaiser [et al.] // Deep Sea Research Part: Oceanographic Research Papers. 2017. Vol. 129. P. 22–31. doi:10.1016/j.dsr.2017.09.006
7. High-frequency in situ optical measurements during a storm event: Assessing relationships between dissolved organic matter, sediment concentrations, and hydrologic processes / J. F. Saraceno [et al.] // Journal of Geophysical Research. Biogeosciences. 2009. Vol. 114, iss. G4. G00F09. doi:10.1029/2009JG000989
8. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2 : Черное море / Ильин Ю. П. [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. 421 с.
9. Ломакин П. Д., Завьялов Д. Д. Поле содержания окрашенного растворенного органического вещества и его связь с соленостью в распресненных прибрежных водах Азовского моря / Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН. 2021. Т. 6, № 3. С. 14–21. doi:10.21072/eco.2021.19.02

Поступила 16.08.2022 г.; одобрена после рецензирования 28.10.2022 г.; принята к публикации 01.02.2023 г.; опубликована 24.03.2023 г.

Об авторах:

Ломакин Павел Демьянович, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор географических наук, профессор, **ResearcherID: V-7761-2017**, **Scopus Author ID: 6701439810**, **IstinaResearcherID: 18321047**, *p_lomakin@mail.ru*

Завьялов Дмитрий Дмитриевич, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), *evilfence@ya.ru*

Заявленный вклад авторов:

Ломакин Павел Демьянович – общая постановка задачи, подбор исходной информации, интерпретация результатов, написание текста статьи

Завьялов Дмитрий Дмитриевич – выполнение расчетов, интерпретация результатов, оформление иллюстраций

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Таксономический состав многощетинковых червей района мидийно-устричной фермы (Черное море, Севастополь)

Е. В. Лисицкая *, Н. А. Болтачева

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Россия

*e-mail: e.lisitskaya@gmail.com

Аннотация

В результате исследований, выполненных в 2015–2019 гг. в районе мидийно-устричного хозяйства, получены данные о видовом составе многощетинковых червей, обитающих в донных отложениях под фермой, в обрастаниях конструкций фермы, а также в планктоне на пелагической стадии развития. Всего идентифицировано 48 видов полихет, относящихся к 25 семействам. При этом на дне под фермой обнаружено 23 вида, в обрастании мидийных коллекторов и устричных садков – 24, в планктоне – личинки 25 видов многощетинковых червей. В бентосе по встречаемости и численности преобладал *Micronephthys longicornis*, а на мидийных коллекторах и устричных садках – представители семейства Nereididae: *Nereis zonata*, *Platynereis dumerilii*, *Alitta succinea*. Таксоцены полихет, обитающих на дне под фермой и в обрастании конструкций фермы, существенно различались по видовому составу (индекс Чекановского – Сьеренсена составлял 0.26). По типу питания в бентосе под фермой 66 % видов относились к детритофагам, хищников и полифагов было немного меньше, а сестонофаги представлены только одним видом. В обрастании преобладали виды-полифаги – 44 %, видов-детритофагов было в четыре раза меньше, а сестонофагов – в три раза больше, чем в бентосе. Высокой встречаемостью характеризовались обнаруженные на створках и в створках мидий и устриц *Hydroides dianthus* (25 %) и *Polydora websteri* (67 %).

Ключевые слова: Annelida, макрозообентос, личинки Polychaeta, Черное море

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по темам: «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (№ гос. регистрации 121030300149-0) и «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана» (№ гос. регистрации 121030100028-0). Выражаем благодарность за помощь в сборе материала С. В. Щурову, И. Ю. Еремину, В. А. Гринцову, М. В. Макарову.

© Лисицкая Е. В., Болтачева Н. А., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Лисицкая Е. В., Болтачева Н. А. Таксономический состав многощетинковых червей района мидийно-устричной фермы (Черное море, Севастополь) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 113–123. EDN QQGUXI. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-113-123

Taxonomic Composition of Polychaete Worms in the Mussel-Oyster Farm Area (the Black Sea, Sevastopol)

E. V. Lisitskaya *, N. A. Boltachova

A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: e.lisitskaya@gmail.com*

Abstract

Studies were conducted in 2015–2019 in the mussel and oyster farm area. Data were obtained on the species composition of polychaete worms in bottom sediments under the farm, in fouling of farm constructions, and in plankton at the larval stages of development. A total of 48 polychaete species belonging to 25 families were identified. At the same time 23 species were found on the bottom under the farm, 24 species were found in the fouling of mussel collectors and oyster cages, and larvae of 25 species of polychaete worms were found in plankton. In the benthos, *Micronephthys longicornis* dominated in terms of occurrence and abundance, while in mussel collectors and oyster cages, species of the family Nereididae (*Nereis zonata*, *Platynereis dumerilii*, *Alitta succinea*) prevailed. The species composition of polychaete taxocene inhabiting the bottom under the farm and that in the fouling of the farm constructions differed significantly (the Czekanowski–Sørensen index was 0.26). In the benthos under the farm, 66 % of the species were deposit feeders by diet type, carnivores and omnivores were much fewer, whereas filter feeders were represented by only one species. Omnivores species dominated in the fouling (44%), deposit feeders species were four times fewer, and filter feeders species were three times more than in the benthos. *Hydroides dianthus* (25 %) and *Polydora websteri* (67 %) found on and in mussel and oyster shells were highly abundant.

Keywords: Annelida, macrozoobentos, larvae Polychaete, the Black Sea

Acknowledgments: The work was performed under state assignment of the Federal Research Center of the IBSS on topic “Regularities of formation and anthropogenic transformation of biodiversity and bioresources of the Azov-Black Sea basin and other regions of the World Ocean” (registration no. 121030100028-0) and “Research of control mechanisms of production processes in biotechnological complexes for the purpose of development of scientific bases of obtaining biologically active substances and technical products of marine genesis” (registration no. 121030300149-0). We thank S. V. Shchurov, I. Y. Eremin, V. A. Grintsov, and M. V. Makarov for their help in collecting the material.

For citation: Lisitskaya, E.V. and Boltachova, N.A., 2023. Taxonomic Composition of Polychaete Worms in the Mussel-Oyster Farm Area (the Black Sea, Sevastopol). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 113–123. EDN QQGUXI. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-113-123

В последние годы у берегов Крыма увеличивается количество морских ферм, выращивающих двусторчатых моллюсков. Функционирующие марихозяйства оказывают сложное и неоднозначное влияние на окружающую среду. Особенно сильному воздействию подвергаются донные сообщества. Это связано с тем, что продукты жизнедеятельности выращиваемых моллюсков являются источником поступления большого количества органических веществ в донные осадки, что приводит к изменению физико-химических и трофических условий существования беспозвоночных: как эпифауны, так и инфауны [1, 2].

Для контроля влияния марихозяйств на окружающую среду проводятся многолетние исследования состояния биоты и водной среды в акватории мидийно-устричных ферм [3]. Масштабы воздействия могут быть различными в зависимости от продолжительности функционирования марихозяйства и объемов выращиваемой продукции, а также от особенностей акватории. У берегов Кавказа в районе размещения мидийных хозяйств, функционирующих в течение пяти лет, было зарегистрировано увеличение численности макрозообентоса в 5 раз, а биомассы – в 3.2 раза. При этом индекс видового разнообразия, наоборот, снизился в среднем в 2.7 раза¹⁾. Есть данные как об отрицательном влиянии на зообентос под морскими фермами, так и об отсутствии такого влияния [1, 4, 5]. Таким образом, мидийно-устричные фермы являются важным средообразующим фактором.

В то же время гидротехнические системы и конструкции ферм можно рассматривать как своеобразный аналог искусственных рифов. Известно, что искусственные рифы могут располагаться как на дне, так и в толще воды. Они являются субстратом для оседания личинок донных организмов, создают убежища для рыб и беспозвоночных, способны привлекать и концентрировать разнообразных гидробионтов [1]. Искусственные рифы создают условия для формирования высокопродуктивных сообществ и сохранения биоразнообразия акваторий.

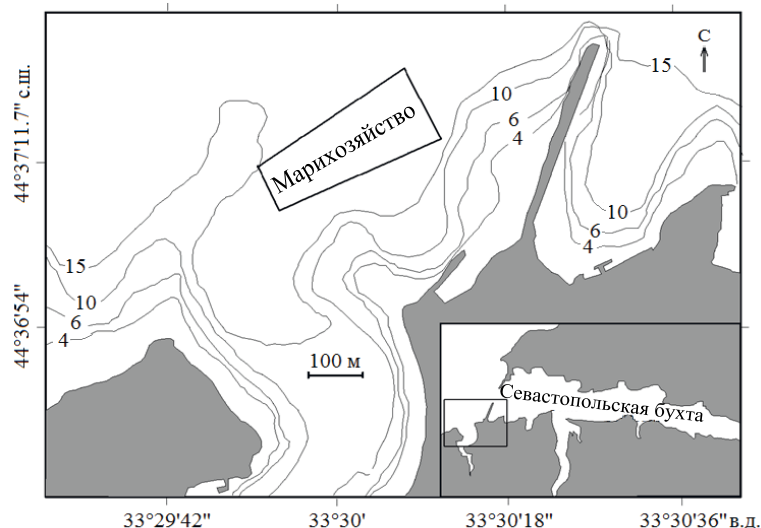
Большинство опубликованных материалов, посвященных гидробионтам, заселяющим искусственные рифы, касается рыб и моллюсков [1]. В отношении многощетинковых червей подобных данных меньше, и они относятся в основном к полихетам-перфораторам и обрастателям раковин моллюсков [6–9].

Целью настоящей работы является изучение таксоцены многощетинковых червей, обитающих в районе мидийно-устричного хозяйства, а именно: в обрастании конструкций фермы, на дне под фермой и в планктоне на пелагической стадии развития.

Материал и методы

Мидийно-устричная ферма размещена на внешнем рейде Севастопольской бухты. Координаты крайних точек марихозяйства – 44° 37' 02.2" с. ш. 33° 29' 53.7" в. д., 44° 37' 05.6" с. ш. 33° 29' 51.5" в. д., 44° 37' 13.3" с. ш. 33° 30' 07.1" в. д., 44° 37' 07.8" с. ш. 33° 30' 11.0" в. д. (рис. 1). Площадь акватории, занимаемая фермой, составляет 4 га, глубины в этом районе 10–16 м,

¹⁾ *Абаев В. Ю.* Влияние культивирования мидий на экосистемы Анапского шельфа Черного моря : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.16. Краснодар, 2001. 18 с.



Р и с . 1 . Карта-схема района исследований

Fig . 1 . Schematic map of the study area

грунт – заиленный песок. Носители с мидийными коллекторами были установлены в 2014 г., а в 2015 г. в акватории марихозьяйства были размещены также две линии садков с устрицами. К 2018 г. морская ферма производила до 100 тыс. шт. устриц и 50 т мидий в год [3, 10].

Пробы макрозообентоса с грунта собирали под плантацией ежемесячно с апреля 2015 г. по май 2016 г. в двух повторностях ручным дночерпателем с площадью захвата 0.04 м^2 . Дальнейшую обработку материала проводили в лаборатории по стандартной методике – промывали через сито (размер ячеек 0.5 мм), фиксировали 4 %-ным раствором формальдегида. Определяли видовой состав полихет, их плотность (N , экз. $\cdot \text{м}^{-2}$), биомассу (B , $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$) и встречаемость (P , %) [6]. В летние периоды 2018 и 2019 гг. под фермой брали качественные пробы макрозообентоса (12 сборов), из которых отбирали полихет и определяли их видовую принадлежность. В качестве материала для исследования также использовали обрастания конструкций фермы. Пробы собирали четыре раза в год (посезонно) в трех повторностях в 2017–2018 гг. Фрагменты мидийных коллекторов и устричные садки помещали на 15 мин в ванны с пресной водой, смывы процеживали через сита с размером ячеек 100 мкм и отделяли полихет [11]. При этом учитывали наличие полихет в раковинах и на раковинах выращиваемых моллюсков.

Пробы меропланктона отбирали в акватории мидийно-устричной фермы ежемесячно в 2015–2019 гг. Материал собирали сетью Джели (диаметр входного отверстия 36 см , размер ячеек 135 мкм) в слое воды от дна до поверхности. Отбирали личинок полихет, их идентификацию проводили на живом материале, используя световые микроскопы МБС-9 и Микмед-5 [12].

Для таксономической идентификации и выделения трофических групп полихет использовали литературные данные [13–15].

Частоту встречаемости видов рассчитывали как выраженное в процентах отношение количества проб, в которых вид был обнаружен, к общему количеству собранных проб. К группе руководящих видов²⁾ (по В. П. Воробьеву – «константных») в таксоцене полихет отнесены виды с встречаемостью 50 % и более, к группе характерных – виды с встречаемостью 25–50 %, к редким – виды, найденные менее чем на 25 % выполненных станций³⁾.

Для оценки сходства видового состава полихет в разных биотопах использовали индекс Чекановского – Сьеренсена $I_{CS} = \frac{2c}{a+b}$, где c – количество видов, общих для обоих списков; a и b – число видов в каждом списке.

Результаты и обсуждение

В период исследований в пробах макрозообентоса, обрастаний и планктона, собранных в районе мидийно-устричной фермы идентифицировано 48 видов полихет, принадлежащих к 25 семействам (таблица). Наибольшее количество видов относилось к семействам: Spionidae (8), Nereididae и Syllidae (по 5 видов), Syllidae (4). Остальные семейства были представлены одним или двумя видами.

Среди макробентосных организмов под фермой обнаружены полихеты 23 видов. В обрастании мидийных коллекторов и устричных садков зарегистрировано 24 вида многощетинковых червей. В планктоне в течение всего периода исследований были отмечены личинки 25 видов полихет [12]. Общими для всех трех изученных биотопов (бентос, обрастания, планктон) были только два вида – *Allita succinea* и *Pholoe inornata*.

В макрозообентосе под фермой преобладали мелкие эррантные формы многощетинковых червей. К руководящим видам этого таксоцена (встречаемость 50–100 %) относились *Micronephthys longicornis*, *Heteromastus filiformis*, *Aricidea claudiae*. Встречаемость большинства видов не превышала 25 %. Данный таксоцен характеризовался низкими количественными показателями, плотность колебалась в пределах 38–388 экз.·м⁻², биомасса 0.04–3.13 г·м⁻². Средняя в течение 13 месяцев плотность полихет составляла 232 ± 29 экз.·м⁻², биомасса – 0.57 ± 0.27 г·м⁻². Доминантом по численности был *Micronephthys longicornis*, его максимальная плотность – 260 экз.·м⁻², средняя – 145 ± 21 экз.·м⁻². Этот вид обычен для Черного моря, довольно часто встречается на заиленных грунтах на глубине до 65 м, образует поселения с высокой плотностью [14]. Из крупных полихет в количественных сборах отмечены *Nephtys hombergii*, в качественных – *Cirriformia tentaculata*, *Polycirrus jubatus*. Первый из указанных видов является эврибионтным и широко распространенным, в результате высокой плотности поселения образует в Черном море самостоятельный биоценоз [14]. Два других вида встречаются реже, не образуют больших скоплений, предпочитают заиленные грунты и небольшие глубины. В целом почти все полихеты, обнаруженные в донном биотопе, за исключением *Syllis hyalina*

²⁾ Зенкевич Л. А., Броцкая В. А. Материалы по экологии руководящих форм бентоса Баренцева моря // Ученые записки Московского университета. 1937. Вып. 13. С. 203–207.

³⁾ Воробьев В. П. Бентос Азовского моря // Труды АзЧерНИРО. Симферополь : Крымиздат, 1949. Вып. 13. 193 с.

Таксономический состав полихет в районе марихозияства

Taxonomic composition of polychaetes in the area of mariculture

Таксономический состав / Taxonomic composition	Встречаемость / Occurrence		в планктоне / in plankton
	в бентосе, % / in benthos, %	в обраста- нии, % / in fouling, %	
<i>Alitta succinea</i> (Leuckart, 1847)	8	83	+
<i>Aricidea (Strelzovia) claudiae</i> Laubier, 1967	62	-	-
<i>Capitella capitata</i> (Fabricius, 1780)	8	-	-
Capitellidae g. sp	8	-	+
<i>Chaetozone caputesocis</i> (Saint-Joseph, 1894)	кач. / qual.	-	-
<i>Cirriformia tentaculata</i> (Montagu, 1808)	кач. / qual.	-	-
<i>Glycera</i> sp.	8	-	-
<i>Ctenodrilus serratus</i> (Schmidt, 1857)	-	17	-
<i>Dorvillea rubrovittata</i> (Grube, 1855)	-	8	-
<i>Eulalia viridis</i> (Linnaeus, 1767)	-	8	-
<i>Eunice vittata</i> (Delle Chiaje, 1828)	кач. / qual.	-	-
<i>Phyllodoce</i> sp.	-	17	+
<i>Genetyllis tuberculata</i> (Bobretzky, 1868)	-	-	+
<i>Harmothoe imbricata</i> (Linnaeus, 1767)	-	92	+
<i>Harmothoe reticulata</i> (Claparède, 1870)	-	92	+
<i>Hediste diversicolor</i> (O.F. Müller, 1776)	-	-	+
<i>Heteromastus filiformis</i> (Claparède, 1864)	69	-	-
<i>Hydroides dianthus</i> (Verrill, 1873)	-	25	+
<i>Lagis neapolitana</i> (Claparède, 1869)	кач. / qual.	-	+
<i>Lysidice ninetta</i> Aud. Et H. M. Edw., 1833	-	17	+
<i>Malacoceros fuliginosus</i> (Claparède, 1870)	-	-	+
<i>Magelona rosea</i> Moore, 1907	15	-	+
<i>Megadrilus purpureus</i> (Schneider, 1868)	8	-	-
<i>Melinna palmata</i> Grube, 1870	8	-	-
<i>Micronephthys longicornis</i> (Perejaslvtseva, 1891)	100	-	-
<i>Microspio mecznikowiana</i> (Claparède, 1869)	-	-	+
<i>Naineris laevigata</i> (Grube, 1855)	кач. / qual.	-	-
<i>Nephtys hombergii</i> Savigny in Lamarck, 1818	23	-	+
<i>Nereis zonata</i> Malmgren, 1867	-	100	+

Продолжение / Continued

Таксономический состав / Taxonomic composition	Встречаемость / Occurrence		в планктоне / in plankton
	в бентосе, % / in benthos, %	в обраста- нии, % / in fouling, %	
Nereididae g.sp.	8	-	+
Paraonidae g. sp.	8	-	-
<i>Perinereis cultrifera</i> (Grube, 1840)	-	33	-
<i>Pholoe inornata</i> Johnston, 1839	кач. / qual.	67	+
<i>Phyllodoce mucosa</i> Örsted, 1843	15	8	-
<i>Platynereis dumerilii</i> (Audouin Milne Edwards, 1834)	8	100	-
<i>Polycirrus jubatus</i> Bobretzky, 1868	кач. / qual.	-	-
<i>Polydora cornuta</i> Bosc, 1802	-	17	+
<i>Polydora websteri</i> Hartman in Loosanoff & Engle, 1943 *	-	67	+
<i>Polyophthalmus pictus</i> (Dujardin, 1839)	-	8	-
<i>Prionospio cirrifera</i> Wirén, 1883	8	-	-
<i>Prionospio</i> sp.	-	8	+
<i>Protodorvillea kefersteini</i> (McIntosh, 1869)	кач. / qual.	-	-
<i>Sabellaria taurica</i> (Rathke, 1837)	-	-	+
<i>Salvatoria clavata</i> (Claparède, 1863)	-	8	
<i>Scolecopsis (Scolecopsis) squamata</i> (O.F. Muller, 1806)	-	-	+
<i>Spirobranchus triqueter</i> (Linnaeus, 1758)	-	17	-
<i>Spio decorata</i> Bobretzky, 1870	-	-	+
Spionidae g. sp	23	-	+
Spirorbinae g. sp	кач. / qual.	кач. / qual.	+
<i>Syllis hyalina</i> Grube, 1863	8	8	-
<i>Syllis prolifera</i> Krohn, 1852	-	8	-
Syllidae gen. sp.	-	17	-
<i>Trypanosyllis zebra</i> (Grube, 1860)	-	17	-

* полихеты обнаружены в раковинах устриц.

Примечание: «кач.» – полихеты из качественных сборов; «+» – вид встречается; «-» – вид не встречается.

* polychaetes found in oyster shells.

Note: “qual.” – polychaetes from quality collections; “+” – species is found; “-” – species is not found.

и Spirorbinae g. sp., характерны для заиленных грунтов. В районе размещения мидийно-устричной фермы как раз и преобладают такие грунты.

В зоне размещения мидийных хозяйств у берегов Кавказа (в районе Анапы) зарегистрировано семь видов полихет¹⁾, пять из которых обнаружены и в ходе наших исследований (*Melinna palmata*, *Pholoe inornata*, *Platynereis dumerilii*, *Eunice vitlala*, *Nephtys hombergii*). При этом доминирующим видом под фермой в районе Анапы указан *Melinna palmata*, а в районе Севастополя – *Micronephthys longicornis*.

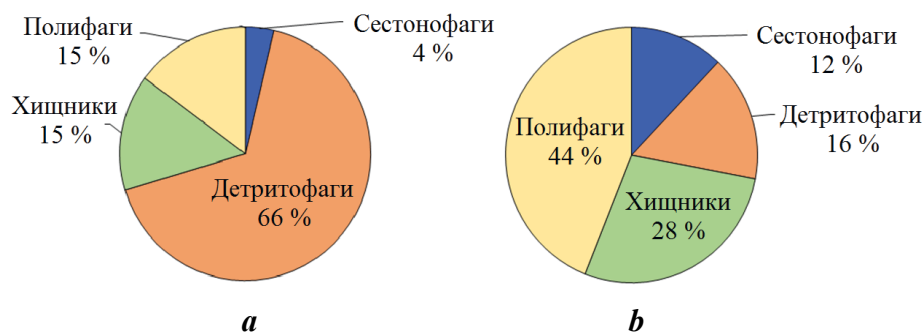
На мидийных коллекторах и в устричных садках наиболее часто (встречаемость 50–100 %) регистрировали *Nereis zonata*, *Platynereis dumerilii*, *Alitta succinea* (сем. Nereididae), а также *Harmothoe imbricata*, *H. reticulata* (сем. Polynoidae), *Pholoe inornata* (сем. Sigalionidae). К характерным видам относились обнаруженные на створках и в створках мидий и устриц *Hydroides dianthus* и *Polydora websteri*. Известно, что эти полихеты наносят существенный урон марикультуре моллюсков во многих районах Мирового океана [6–9]. Указанные виды являются недавними вселенцами в Черное море, их высокая встречаемость свидетельствует об успешной акклиматизации данных полихет в акватории Севастополя. Представляет интерес обнаружение видов, считающихся очень редкими для Черного моря, – *Ctenodrilus serratus*⁴⁾ и *Chaetozone caputexotic* [14].

На мидийной ферме у Кавказского побережья Черного моря в районе Сочи в обрастании коллекторов отмечено шесть видов полихет. Массовыми, как и в наших исследованиях, являлись *Alitta succinea*, *Nereis zonata*, *Platynereis dumerilii*. Наиболее высокая численность отмечена у *A. succinea*⁵⁾.

Таксоцены полихет, обитающих на дне под фермой и в обрастании конструкций фермы, существенно различались между собой по видовому составу, что подтверждается низким значением индекса Чекановского – Сьеренсена (0.26). На конструкциях марихозяйства из 24 обнаруженных видов полихет 18 не были зарегистрированы в донных отложениях под фермой. Трофическая структура таксоцены полихет в этих двух биотопах была представлена четырьмя пищевыми группировками: детритофагами, сестонофагами, хищниками и полифагами. Однако количественное соотношение видов этих группировок в биотопах различалось. В бентосе под фермой большая часть видов относилась к детритофагам, хищников и полифагов было намного меньше, а сестонофаги представлены только одним видом (рис. 2). В обрастании преобладали виды-полифаги, видов-детритофагов было в четыре раза меньше, а сестонофагов – в три раза больше, чем в бентосе. При этом половина детритофагов в бентосе относилась к грунтоедом, а половина – к собирающим детритофагам. В обрастании группа детритофагов представлена только видами, собирающими детрит.

⁴⁾ Якубова Л. И. Список Archannelidae и Polychaeta в Севастопольской бухте Черного моря // Известия АН СССР. Серия. 7. Отделение физико-математических наук. 1930. № 9. С. 863–881.

⁵⁾ Яхонтова И. В. Сообщество обрастания мидийных коллекторов в восточной части Черного моря : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.18. Москва : ВНИРО, 2008. 25 с.



Р и с . 2. Трофическая структура таксоцена полихет в бентосе под фермой (а) и на коллекторах (б)

Fig. 2. Trophic structure of polychaetes taxocene in the benthos under the farm (a) and on the collectors (b)

Таким образом, различие в таксономическом составе полихет в бентосе под фермой и на коллекторах обусловлено существенным различием этих субстратов, а также трофическими предпочтениями видов, обитающих в этих биотопах.

Пелагические личинки многщетинковых червей в акватории марихозьяства, как и в прилегающих районах у берегов Юго-Западного Крыма, встречались во все сезоны года [16]. Их таксономический состав соответствовал срокам размножения взрослых особей. В зимний период в планктоне преобладали личинки *Harmothoe imbricata*, весной их разнообразие увеличивалось, появлялись *Harmothoe reticulata*, *Pholoe inornata*, *Allita succinea*, *Nereis zonata*. В летний период доминировали нектохеты *Nephtys hombergii*. Личинки полихет семейства Spionidae (*Polydora cornuta*, *Malacoceros fuliginosus*, *Spio decorata*, *Prionospio* sp.) преобладали в планктоне с апреля по октябрь. Личинки полихет, которые поселяются на раковинах и в раковинах выращиваемых моллюсков, отмечены: *Polydora websteri* – с июня по октябрь, *Hydroides dianthus* – в октябре – ноябре [12]. Только в планктоне обнаружены семь видов Polychaeta, три из них – *Malacoceros fuliginosus*, *Scolelepis squamata*, *Microspio mecznikowiana* – являются относительно редкими для Черного моря. Полихета *Sabellaria taurica* – обитатель своеобразного биотопа (песок с крупным ракушечником), не представленного в районе исследования.

Так как многие виды многщетинковых червей имеют в жизненном цикле пелагическую стадию развития, то формирование таксоцена полихет в обрастании конструкций фермы происходит в основном за счет оседания личинок из планктона акватории марихозьяства. Сходство таксоценов полихет обрастания и планктона существенно выше, чем таксоценов обрастания и бентоса, что подтверждается значением индекса Чекановского – Сьеренсена (0.50).

Заключение

В результате исследований, выполненных в 2015–2019 гг. в районе мидийно-устричной фермы, идентифицировано 48 видов полихет. При этом на дне под фермой обнаружено 23 вида, в обрастании мидийных коллекторов и устричных садков – 24, в планктоне – личинки 25 видов многщетинковых червей. Отмечены недавние вселенцы – *Hydroides dianthus* и *Polydora websteri*,

а также редкие для Черного моря виды – *Ctenodrilus serratus* и *Chaetozone carputexotic*. Отмечено своеобразие таксоценов полихет в каждом из исследованных биотопов. Видовой состав таксоценов полихет, обитающих на дне под фермой и в обрастании конструкций фермы, существенно различался (индекс Чекановского – Сьеренсена составлял 0.26). На конструкциях мари-хозяйства обнаружено 18 видов многощетинковых червей, не зарегистрированных в донных отложениях под фермой. В бентосе под фермой 66 % видов относились к детритофагам, хищников и полифагов было намного меньше, а сестонофаги представлены только одним видом. В обрастании преобладали виды-полифаги – 44 %, видов-детритофагов было в четыре раза меньше, а сестонофагов – в три раза больше, чем в бентосе. Таким образом, создание мидийно-устричной фермы, представляющей собой дополнительный субстрат для обитания полихет и оседания их пелагических личинок, способствует увеличению видового богатства *Polychaeta* исследованного района.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Б. Г. Гидробиологические основы управления состоянием прибрежных экосистем Черного моря. Киев : Наукова думка, 2008. 343 с.
2. Кругликов О. Е., Иванов М. В. Воздействие Соностровского мидиевого хозяйства на бентосные сообщества // Материалы научной конференции, посвященной 70-летию Беломорской биологической станции им. Н. А. Перцова, 9–10 августа 2008 г. Москва : Изд. «Гриф и К», 2008. С. 70–74. URL: https://wsbs-msu.ru/res/DOCFOLDER61/materials_XI_nauch_konf_wsbs_msu.pdf (дата обращения: 23.02.2023).
3. Long-term variations of thermohaline and hydrochemical characteristics in the mussel farm area in the coastal waters off Sevastopol (Black Sea) in 2001–2018 / S. V. Kapranov [et al.] // Continental Shelf Research. 2020. Vol. 206. 104185. doi:10.1016/j.csr.2020.104185
4. Иванов М. В., Чивилев С. М. Долговременная сукцессия бентоса под хозяйствами марикультуры мидий в Белом море // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 3. Биология. 2007. № 4. С. 63–72. EDN RTSWHV.
5. Макрозообентос рыхлых грунтов под мидийно-устричной фермой (Черное море, район Севастополя) / Н. А. Болтачева [и др.] // Морской биологический журнал. 2018. Т. 3, № 1. С. 9–22. doi:10.21072/mbj.2018.03.1.02
6. Rodewald N., Snyman R., Simon C. A. Worming its way in – *Polydora websteri* (Annelida: Spionidae) increases the number of non-indigenous shell-boring polydorin pests of cultured molluscs in South Africa // Zootaxa. 2021. Vol. 4969, iss. 2. P. 255–279. doi:10.11646/zootaxa.4969.2.2
7. A global invader or a complex of regionally distributed species? Clarifying the status of an invasive calcareous tubeworm *Hydroides dianthus* (Verrill, 1873) (Polychaeta: Serpulidae) using DNA barcoding / Y. Sun [et al.] // Marine Biology. 2017. Vol. 164. 28. doi:10.1007/s00227-016-3058-9
8. Confirmation of the shell-boring oyster parasite *Polydora websteri* (Polychaeta: Spionidae) in Washington state, USA / J. C. Martinelli [et al.] // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. 3961. doi:10.1038/s41598-020-60805-w
9. Spread of the invasive shell-boring annelid *Polydora websteri* (Polychaeta, Spionidae) into naturalised oyster reefs in the European Wadden Sea / A. M. Waser [et al.] // Marine Biodiversity. 2020. Vol. 50. 63. doi:10.1007/s12526-020-01092-6

10. *Поспелова Н. В., Приймак А. С., Рябушко В. И.* Содержание микроэлементов в мягких тканях и раковинах мидии *Mytilus galloprovincialis*, культивируемой на взморье г. Севастополя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 4. С. 67–80. EDN GEWMWQ. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-67-80
11. *Лисицкая Е. В., Щуров С. В.* Роль полихет в сообществе обрастания на мидийно-устричных фермах (Крым, Черное море) // Вопросы рыболовства. 2020. Т. 21, № 1. С. 74–83. EDN OLWCEF.
12. *Лисицкая Е. В.* Таксономический состав и сезонная динамика меропланктона в районе мидийно-устричной фермы (Севастополь, Крым, Черное море) // Морской биологический журнал. 2017. Т. 2, № 4. С. 38–49. doi:10.21072/mbj.2017.02.4.04
13. *Киселева М. И.* Бентос рыхлых грунтов Черного моря. Киев : Наукова думка, 1981. 165 с. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/8133> (дата обращения: 23.02.2023).
14. *Киселева М. И.* Многощетинковые черви (Polychaeta) Черного и Азовского морей. Апатиты : Изд-во Кольского научного центра РАН, 2004. 409 с.
15. *Jumars P. A., Dorgan K. M., Lindsay S. M.* Diet of worms emended: an update of polychaete feeding guilds // Annual Review of Marine Science. 2015. Vol. 7. P. 497–520. doi:10.1146/annurev-marine-010814-020007
16. Комплексные исследования экологического состояния прибрежной акватории Севастополя (Западный Крым, Черное море) / В. И. Рябушко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 103–118. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-103-118

Поступила 28.07.2022 г.; одобрена после рецензирования 2.12.2023 г.; принята к публикации 01.02.2023 г.; опубликована 24.03.2023 г.

Об авторах:

Лисицкая Елена Васильевна, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8219-4616**, **Scopus Author ID: 6504112143**, **ResearcherID: T-1970-2017**, *e.lisitskaya@gmail.com*

Болтачева Наталья Александровна, ведущий научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0618-1992**, **Scopus Author ID: 36149089700**, *nboltacheva@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Лисицкая Елена Васильевна – постановка задачи исследования, анализ состава и численности многощетинковых червей в обрастании и планктоне, формирование статьи

Болтачева Наталья Александровна – анализ состава и численности многощетинковых червей в бентосе, подготовка графических материалов, редактирование рукописи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Влияние бикомпонентных наночастиц ZnO-ZnFe₂O₄ на гемоциты средиземноморской мидии (*Mytilus galloprovincialis*) в условиях эксперимента *in vitro*

М. С. Подольская^{1*}, А. А. Ткачук¹, А. Ю. Андреева¹,
Е. С. Кладченко¹, Э. С. Челебиева¹, А. А. Мосунов²

¹ Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН,
Севастополь, Россия

² Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия
*e-mail: podolskaya_m99@bk.ru

Аннотация

Исследовано токсическое действие бикомпонентных наночастиц ZnO-ZnFe₂O₄, являющихся основным действующим компонентом отечественного противобрастающего покрытия, на маркерные показатели клеток гемолимфы (гемоциты) средиземноморской мидии (*Mytilus galloprovincialis*) в экспериментальных условиях *in vitro*. Оценивались следующие показатели: смертность, клеточный состав и продукция активных форм кислорода. В эксперименте гемоциты инкубировали в течение 1 и 2 ч в 1 мл стерильной морской воды, содержащей наночастицы в различных концентрациях: 0.03, 0.3 и 3 мг/мл. Данные анализировали с помощью метода точной цитометрии. Установлено, что действие наночастиц ZnO-ZnFe₂O₄ оказало влияние на клеточный состав гемолимфы: снижалась доля агранулоцитов, воздействие 0.03 мг/мл наночастиц при часовой инкубации снижало уровень продукции активных форм кислорода в 2.5 раза по сравнению с контрольной пробой ($p \leq 0.05$). Инкубация гемоцитов с максимальной концентрацией наночастиц (3 мг/мл) привела к гибели клеток уже через 1 ч после воздействия. Острог токсического воздействия на гемоциты при применении 0.03 мг/мл и 0.3 мг/мл наночастиц оксида цинка и феррита цинка не наблюдалось.

Ключевые слова: наночастицы, средиземноморская мидия, гемоциты, АФК

Благодарности: синтез наночастиц (ZnO-ZnFe₂O₄) был выполнен в рамках выполнения проекта РФФ № 21-13-00498 «Экологически безопасные и высокоэффективные противобрастающие покрытия на основе бикомпонентных наночастиц металлов и их оксидов». Оценка токсичности наночастиц на организм мидий (анализ параметров гемоцитов) проводился за счет средств госзадания ФИЦ ИнБЮМ № 121102500161-4 «Закономерности организации иммунной системы промысловых гидробионтов и исследование влияния факторов внешней среды на функционирование их защитных систем».

© Подольская М. С., Ткачук А. А., Андреева А. Ю.,
Кладченко Е. С., Челебиева Э. С., Мосунов А. А., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Влияние бикомпонентных наночастиц ZnO-ZnFe₂O₄ на гемоциты средиземноморской мидии (*Mytilus galloprovincialis*) в условиях эксперимента *in vitro* / М. С. Подольская [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 124–136. EDN BPTQRT. doi:10.29039/2413-5577-2023-124-136

Effect of Bicomponent ZnO-ZnFe₂O₄ Nanoparticles on Mediterranean Mussel (*Mytilus galloprovincialis*) Hemocytes under *in vitro* Conditions

**M. S. Podolskaya^{1*}, A. A. Tkachuk¹, A. Yu. Andreyeva¹,
E. S. Kladchenko¹, E. S. Chelebieva¹, A. A. Mosunov²**

¹ *Institute of Biology of the Southern Seas named after A.O. Kovalevsky RAS, Sevastopol, Russia*

² *Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

**e-mail: podolskaya_m99@bk.ru*

Abstract

The present work investigates the toxic effect of bicomponent ZnO-ZnFe₂O₄ nanoparticles, which are the main active component of the domestic antifouling coating, on marker indicators of Mediterranean mussel (*Mytilus galloprovincialis*) hemolymph cells (hemocytes) under *in vitro* experimental conditions. The following indicators were evaluated: mortality, cellular composition and production of reactive oxygen species. In the experiment, hemocytes were incubated for 1 and 2 hours in 1 mL of sterile seawater containing nanoparticles of different concentrations: 0.03, 0.3 and 3 mg/mL. The data were analyzed using the flowing cytometry. It was shown that ZnO-ZnFe₂O₄ nanoparticles had an effect on the cellular composition of the hemolymph: the proportion of agranulocytes decreased and hour exposure to 0.03 mg/mL nanoparticles reduced the level of production of reactive oxygen species by 2.5 times compared to the control ($p \leq 0.05$). Incubation of hemocytes with a maximum concentration of nanoparticles (3 mg/mL) led to cell death within 1 hour after exposure. No acute toxic effects on hemocytes with the use of 0.03 mg/mL and 0.3 mg/mL of zinc oxide and zinc ferrite nanoparticles were observed.

Key words: nanoparticles, Mediterranean mussel, hemocytes, reactive oxygen species

Acknowledgements: the synthesis of nanoparticles (ZnO-ZnFe₂O₄) was carried out under RSF project no. 21-13-00498 “Environmentally safe and highly effective antifouling coatings based on bicomponent metal nanoparticles and their oxides”. Assessment of the toxicity of nanoparticles on the body of mussels (analysis of hemocyte parameters) was carried out at the expense of the state task of FRC IBSS No. 121102500161-4 “Patterns of the organization of the immune system of commercial hydrobionts and the study of the influence of environmental factors on the functioning of their protective systems”.

For citation: Podolskaya, M.S., Tkachuk, A.A., Andreyeva, A.Yu., Kladchenko, E.S., Chelebieva, E.S. and Mosunov, A.A., 2023. Effect of Bicomponent ZnO-ZnFe₂O₄ Nanoparticles on Mediterranean Mussel (*Mytilus galloprovincialis*) Hemocytes under *in vitro* Conditions. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 124–136. EDN BPTQRT. doi:10.29039/2413-5577-2023-124-136

Введение

Биообрастание – это естественный процесс, предполагающий прикрепление микро- и макроорганизмов к различным субстратам, находящимся в водной среде¹⁾. При этом поселение организмов-обрастателей на поверхностях гидротехнических сооружений причиняет значительный ущерб судоходству, нефтяным платформам и промышленности в целом [1, 2]. Общемировой ущерб от морского обрастания на данный момент превышает 50 млрд долларов США в год [3]. Основная задача противообрастающих покрытий – предотвращение образования биологической пленки, которая является первым этапом биообрастания [4]. В то же время такие покрытия должны быть безопасными по отношению к нецелевым организмам. Широко применяемые в прошлом противообрастающие покрытия создавали на основе таких биоцидов, как трибутилолово и медь, которые оказались высокотоксичными по отношению к морским организмам и были запрещены [5–7].

Один из инновационных методов защиты от биообрастания – применение покрытий на основе наноструктур оксидов металлов [8]. Наиболее часто используются наночастицы металлов цинка, алюминия, железа, титана, серебра и меди, а также их оксиды [9]. Такие наночастицы обладают доказанными антибактериальными, антикоррозионными и противообрастающими свойствами [10].

Важным качеством новых противообрастающих компонентов является их низкая токсичность для водных организмов. Тем не менее имеющихся в литературе данных недостаточно для того, чтобы сделать однозначный вывод о токсичности наночастиц по отношению к морским организмам. Известно, что токсичность наночастиц зависит от вида металла, размера, формы и поверхностного заряда частиц [11]. Среди возможных механизмов токсического действия наночастиц на организм гидробионтов можно выделить продукцию ими активных форм кислорода (АФК), что является следствием непропорционально большой площади поверхности наночастиц [12]. Перепроизводство АФК, превышающее способность клеток к антиоксидантной защите, вызывает окислительный стресс, приводящий к нарушениям структуры клеточной мембраны, митохондрий, окислению белков и ДНК [13, 14]. Например, исследование воздействия наночастиц оксигидроксида алюминия (бёмита) не выявило острой токсичности по отношению к *Daphnia magna* (Straus, 1820) [15]. В то же время исследование наночастиц диоксида титана выявило способность наночастиц накапливаться в организме дафний [16]. Воздействие наночастиц оксида меди приводило к нарушению поведения моллюска *Scrobicularia plana* (da Costa, 1778) [17]. А воздействие наночастиц оксида цинка оказывало негативное влияние на развитие личинок морской рыбы *Oryzias melastigma* (McClelland, 1839) [18].

В настоящий момент разработка противообрастающих покрытий на основе наночастиц считается перспективным направлением. Ранее был создан новый компонент противообрастающей краски, содержащий наночастицы

¹⁾ Подводная технология / В. А. Коробков [и др.]. Ленинград : Судостроение, 1981. 240 с. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-podvodnaya-tehnologiya.pdf> (дата обращения: 11.03.2023).

ZnO-ZnFe₂O₄, полученные путем электрического взрыва свитых проволочек цинка и железа в кислородосодержащей атмосфере. Наночастицы ZnO способны поглощать видимый свет и ингибировать рост микроорганизмов вследствие фотокаталитического процесса [19]. Состав является отечественной разработкой и имеет доказанные противообрастающие свойства [20], но нет данных о его безопасности по отношению к морским организмам. Поскольку применяемый нами способ получения наночастиц является достаточно оригинальным [21], а частицы изучаемого состава, как нам известно, были получены впервые, подробное изучение их физико-химических свойств, а также механизмы биологического действия являются предметом наших будущих исследований.

Двустворчатые моллюски являются удобными модельными объектами для изучения воздействия наночастиц, так как ведут прикрепленный образ жизни и являются фильтраторами [22]. Функциональное состояние моллюсков оценивают по морфологическим и физиологическим показателям клеток гемолимфы – гемоцитам, которые, в свою очередь, являются эффекторами клеточного иммунитета [23]. В основе клеточного иммунного ответа лежит продукция гемоцитами активных форм кислорода (АФК), фагоцитоз и инкапсуляция инородных тел [24, 25]. Гемоциты моллюска реагируют на действие раздражителей респираторным взрывом, суть которого состоит в резком увеличении продукции клетками АФК, вызывающими окислительный стресс у патогенных организмов [26]. Гемоциты являются общепринятой моделью для оценки физиологического состояния моллюсков [6].

Изучение токсичности новых компонентов краски на основе наночастиц, определение допустимых диапазонов концентрации и понимание влияния наночастиц на эффекторы иммунной системы является актуальной задачей. В связи со сказанным выше целью настоящей работы является оценка токсического действия наночастиц ZnO-ZnFe₂O₄ на функциональные показатели гемоцитов гемолимфы двустворчатого моллюска *Mytilus galloprovincialis*.

Материалы и методы

Половозрелые мидии (*M. galloprovincialis*) возрастом четыре года, массой 12.9 ± 2.3 г, размером 57.8 ± 1.8 мм были отобраны в количестве 210 шт. в прибрежной акватории Севастополя (температура воды 15–20 °С, соленость 17–18 ЕПС, содержание кислорода 7.2–8.5 мг/л). Мидий доставляли в лабораторию в пластиковых контейнерах без воды. Моллюсков акклимировали к лабораторным условиям в аквариумах с плотностью посадки 3–5 л на особь в течение 7 сут. В аквариумах поддерживались условия, близкие к точке сбора материала: температура – 23.3 ± 0.1 °С, соленость – 18.2 ± 0.02 ЕПС, pH – 8.1 ± 0.01 , содержание кислорода – 7.7 ± 0.1 мг/л. Содержание кислорода и температуру воды контролировали при помощи портативного кислородомера с температурным датчиком ST300D (Ohaus, США). Соленость и pH контролировали при помощи портативного кондуктометра-солемера sensION 5 HACH (США) и pH-метра ST2100-F (Ohaus, США). На протяжении всего эксперимента, включая период акклимации к лабораторным условиям, для удаления метаболитов ежедневно меняли воду с сохранением значения солености. Моллюсков кормили смесью микроводорослей *Tetraselmis viridis* (штамм IBSS–25 из коллекции отдела биотехнологии и фиторесурсов ФИЦ ИнБЮМ)

из расчета 5–10 мл смеси на каждые 50 л аквариумной воды. После акклимации гидробионтов разделили на 7 групп по 30 особей в каждой группе (одна контрольная, три группы с инкубацией в течение 1 ч (группы 1.1, 1.2 и 1.3), три группы с инкубацией в течение 2 ч (группы 2.1, 2.2 и 2.3).

Влияние наночастиц на гемоциты моллюсков исследовалось в условиях *in vitro*. Для этого у 10 особей стерильным шприцем из мускула-замыкателя отбирали гемолимфу и объединяли в одну пробу. Для получения гемоцитов объединенную пробу трижды отмывали в стерильной морской воде путем центрифугирования (500 g, 5 мин). Для дальнейшего анализа использовали осадок. Все работы по отмывке и подготовке клеток для анализа проводились при температуре +4 °С для предотвращения слипания клеток.

В эксперименте клетки инкубировали в 1 мл стерильной морской воды, содержащей наночастицы. В каждой пробе содержалось $1 \cdot 10^6$ клеток/мл. В работе применялись синтезированные в рамках проекта Российского научного фонда биметаллические наночастицы ZnO-ZnFe₂O₄ в различных концентрациях: 0.03 (концентрация ниже активной в 10 раз), 0.3 (активная концентрация разработанной противообрастающей смеси) и 3 (концентрация выше активной в 10 раз) мг/мл. Клетки инкубировали в термошейкере с охлаждением для микропробирок (*Biosan TS-100C*) при температуре +4 °С и 1000 об/мин. Одну часть проб гемоцитов в диапазоне исследуемых концентраций наночастиц (группы 1.1 (концентрация наночастиц в пробе 0.03 мг/мл), 1.2 (0.3 мг/мл) и 1.3 (0.03 мг/мл)) инкубировали в течение 1 ч, другую (группы 2.1 (концентрация наночастиц в пробе 0.03 мг/мл), 2.2 (0.3 мг/мл) и 2.3 (0.03 мг/мл)) – в течение 2 ч. Контролем служила проба гемоцитов в морской воде без наночастиц. После инкубации клетки опытных проб отмывали от наночастиц в стерильной морской воде путем центрифугирования (500 g, 5 мин).

Анализ функциональных показателей гемоцитов проводился на проточном цитометре *Cytomics FC 500* (*Beckman Coulter*, США), оборудованном однофазным аргоновым лазером (длина волны 488 нм). Для анализа методом проточной цитометрии готовили суспензию с концентрацией гемоцитов $(1-2) \cdot 10^6$ клеток на 1 мл.

Для идентификации типов гемоцитов готовую суспензию клеток гемолимфы окрашивали красителем *SYBR Green I* (*SGI*). Финальная концентрация *SGI* в пробе – 10 мкмоль/л. Окрашенные клетки инкубировали 40 мин в темноте при 4 °С. Содержание ДНК в гемоцитах анализировали на основании гистограмм распределения флуоресценции красителя в канале *FL1* при помощи программы *Flowing Software 5.2*. Ось абсцисс на гистограмме распределения флуоресценции красителя отображала содержание ДНК в клетках, а ось ординат – число клеток.

Оценка способности гемоцитов к спонтанной продукции АФК проводилась на основании оценки интенсивности флуоресценции красителя 2-7-дихлорфлуоресцеин-диацетата (*DCF-DA*). Затем 1 мл суспензий гемоцитов инкубировали с 10 мкл раствора *DCF-DA* в течение 40 мин в темноте. Финальная концентрация красителя в пробе составляла 10 мкмоль/л. Флуоресценция красителя анализировалась в канале *FL1*.

Выживаемость гемоцитов определяли при помощи йодистого пропидия (PI), флуоресцентного красителя для нуклеиновых кислот. К 1 мл суспензии гемоцитов добавляли 10 мкл раствора PI (*Sigma Aldrich*) и инкубировали в темноте в течение 40 мин при 4 °С. Долю мертвых клеток в общем числе гемоцитов оценивали по гистограммам флуоресценции PI в канале FL2 цитометра.

При обработке результатов нормальность распределения проверяли при помощи теста Колмогорова – Смирнова. Различия между группами анализировали с использованием программного обеспечения *RStudio*, версия 4.1.0.

Распределение функциональных показателей гемоцитов не подчинялось нормальному закону распределения, поэтому данные анализировали при помощи непараметрического критерия Манна – Уитни. Результаты выражены как среднее значение ± стандартная ошибка среднего.

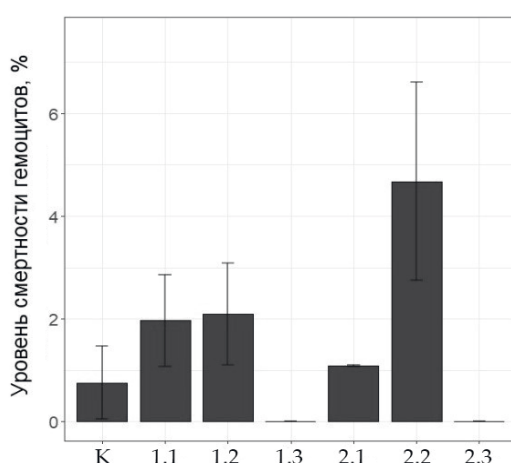


Рис. 1. Влияние наночастиц ZnO-ZnFe₂O₄ на смертность гемоцитов средиземноморской мидии (*M. Galloprovincialis*): К – контроль; 1.1 – инкубация 1 ч, концентрация 0.03 мг/мл; 1.2 – инкубация 1 ч, концентрация 0.3 мг/мл; 1.3 – инкубация 1 ч, концентрация 3 мг/мл; 2.1 – инкубация 2 ч, концентрация 0.03 мг/мл; 2.2 – инкубация 2 ч, концентрация 0.3 мг/мл; 2.3 – инкубация 2 ч, концентрация 3 мг/мл

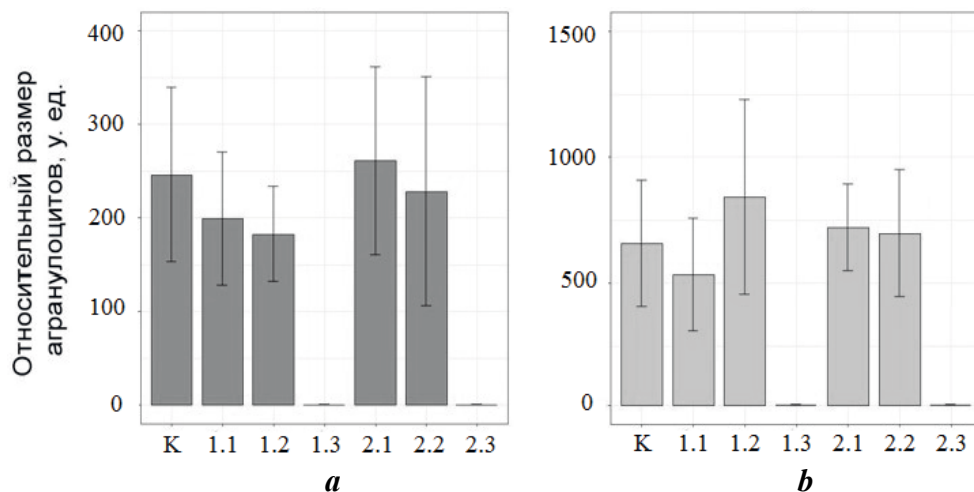
Fig. 1. Effect of ZnO-ZnFe₂O₄ nanoparticles on the mortality of Mediterranean mussel (*M. galloprovincialis*) hemocytes. K – control; 1.1 – incubation 1 h, concentration 0.03 mg/mL; 1.2 – incubation 1 h, concentration 0.3 mg/mL; 1.3 – incubation 1 h, concentration 3 mg/mL; 2.1 – incubation 2 h, concentration 0.03 mg/mL; 2.2 – incubation 2 h, concentration 0.3 mg /mL; 2.3 – incubation 2 h, concentration 3 mg/mL

Результаты

Достоверных различий между контрольной (проба гемоцитов в морской воде без наночастиц) и опытными (пробы гемоцитов с различными концентрациями наночастиц и временем инкубации (группы 1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2 и 2.3) группами гемоцитов по количеству мертвых клеток не выявлено, хотя наблюдалась тенденция к увеличению их числа в результате воздействия наночастиц (рис. 1).

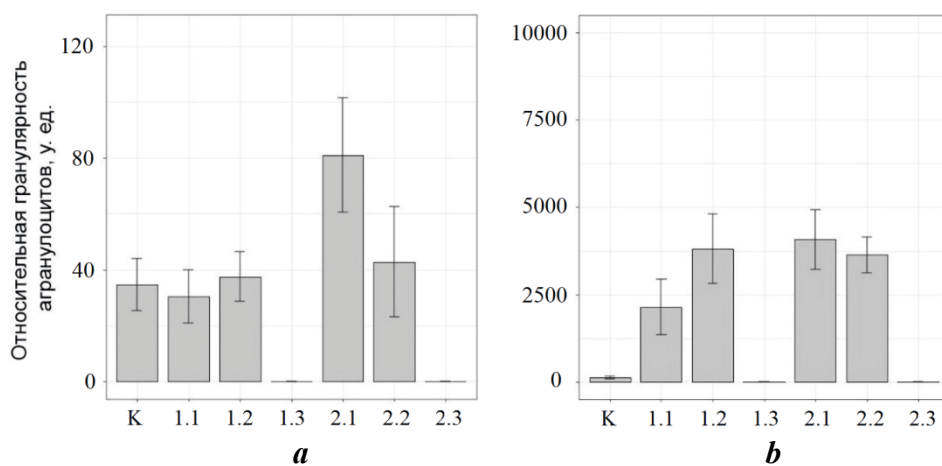
Так как краситель проникает в клетки через поврежденную мембрану, отсутствие данных на графике при воздействии максимальной концентрации (3 мг/мл) указывает на то, что клетки гемолимфы разрушились и погибли уже после первого часа воздействия, и были удалены другими гемоцитами посредством фагоцитоза.

Воздействие наночастиц на размер и гранулярность клеток гемолимфы мидии показано на рис. 2 и 3. Достоверных различий между группами не выявлено, что может свидетельствовать о том, что присутствующие в пробах наночастицы не оказали существенного воздействия на размер и гранулярность гемоцитов. Однако наблюдалась тенденция к снижению размера агранулоцитов при увеличении концентрации наночастиц.



Р и с . 2 . Влияние наночастиц $ZnO-ZnFe_2O_4$ на относительный размер гемоцитов средиземноморской мидии (*M. galloprovincialis*): *a* – агранулоцитов; *b* –гранулоцитов. Остальные обозначения те же, что для рис. 1

Fig. 2. Effect of $ZnO-ZnFe_2O_4$ nanoparticles on the relative size of hemocytes of Mediterranean mussel (*M. galloprovincialis*): *a* – that of agranulocytes; *b* – that of granulocytes. For the other nomenclatures see Fig. 1



Р и с . 3 . Влияние наночастиц $ZnO-ZnFe_2O_4$ на относительную гранулярность гемоцитов средиземноморской мидии (*M. galloprovincialis*): *a* – агранулоцитов; *b* – гранулоцитов. Остальные обозначения те же, что для рис. 1

Fig. 3. The effect of $ZnO-ZnFe_2O_4$ nanoparticles on the relative granularity of Mediterranean mussel (*M. galloprovincialis*) hemocytes: *a* – that of agranulocytes; *b* – that of granulocytes. For the other nomenclatures see Fig. 1

В результате инкубации гемоцитов с наночастицами отмечались небольшие изменения в уровне относительной гранулярности гемоцитов: значения бокового рассеяния у агранулоцитов возрастали при увеличении концентрации наночастиц, тогда как у гранулоцитов, напротив, наблюдалась тенденция к повышению уровня гранулярности цитоплазмы в зависимости от концентрации (рис. 3). Вместе с тем изменения значений бокового рассеяния между контрольными и опытными группами не были достоверны.

Наночастицы существенно повлияли на спонтанную продукцию АФК клетками гемолимфы. Интенсивность флуоресценции агранулоцитов и гранулоцитов, окрашенных флуоресцентным красителем *DCF-DA*, снижалась в зависимости от концентрации наночастиц в среде (рис. 4). Продукция АФК агранулоцитами снизилась в 2.5 раза с 182.3 ± 69.7 относительных единиц флуоресценции (ОЕФ) в контрольной пробе до 72.1 ± 28.2 ОЕФ в пробе с часовой инкубацией, содержащей наночастицы в концентрации 0.03 мг/мл ($p \leq 0.05$). Рост продукции АФК наблюдался только при двухчасовой инкубации при воздействии наночастиц в концентрации 0.3 мг/мл на обе популяции клеток, однако эти изменения были статистически незначимыми.

Обсуждение

Результаты работы свидетельствуют о том, что активная концентрация наночастиц (0.3 мг/мл) не оказывала существенного воздействия на гемоциты средиземноморской мидии *M. galloprovincialis*. Достоверных различий в функциональных показателях клеток между контрольной и опытными

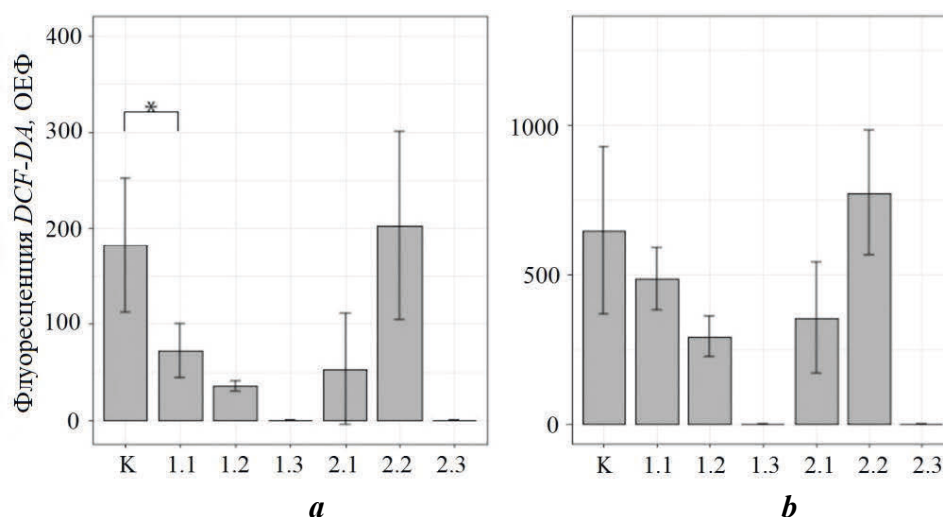


Рис. 4. Влияние наночастиц $ZnO-ZnFe_2O_4$ на интенсивность флуоресценции *DCF-DA* в гемоцитах средиземноморской мидии (*M. galloprovincialis*): *a* – в агранулоцитах, ОЕФ; *b* – в гранулоцитах, ОЕФ. Остальные обозначения те же, что для рис. 1

Fig. 4. The effect of $ZnO-ZnFe_2O_4$ nanoparticles on DCF-DA fluorescence intensity of the Mediterranean mussel (*M. galloprovincialis*) hemocytes: *a* – in agranulocytes, relative fluorescent units, RFU; *b* – in granulocytes, RFU. For the other nomenclatures see Fig. 1

группами выявлено не было. Наблюдалась тенденция к росту доли гранулоцитов и снижению доли агранулоцитов. Наблюдалось также незначительное увеличение размера и гранулярности клеток. Концентрация наночастиц ниже активной в 10 раз (0.03 мг/мл) также не оказала существенного влияния на функциональные показатели гемоцитов мидии. Вместе с тем воздействие наночастиц при часовой инкубации снижало уровень продукции АФК в 2.5 раза по сравнению с контрольной пробой. Инкубация гемоцитов с наночастицами в концентрации выше активной в 10 раз (3 мг/мл) привела к гибели клеток уже через 1 ч после воздействия.

Известно, что гемоциты двустворчатых моллюсков играют важную функциональную роль в организме, отвечая за клеточно-опосредованный иммунитет путем фагоцитоза и продукции цитотоксических молекул различной природы [23]. Во время инкубации гемоцитов с наночастицами отмечалась тенденция к увеличению размера и степени гранулярности гемоцитов, что может говорить об активном фагоцитозе наночастиц. В этом случае формирование фагосом с наночастицами приводило к увеличению неоднородности содержимого цитоплазмы гемоцитов и, как следствие, возрастанию показателя бокового рассеяния. Изменения формы клеток, содержащих различные количества наночастиц, также влияли на величину прямого рассеяния проб. Интенсивное поглощение наночастиц гемоцитами, вероятно, способно снижать общую фагоцитарную емкость гемоцитов, что может привести к ослаблению врожденной иммунной системы двустворчатых моллюсков [27]. Аналогично нашим результатам воздействие наночастиц Ag и TiO₂ на гемолимфу устрицы *Crassostrea virginica* также приводило к снижению фагоцитоза клетками после двухчасового воздействия [28].

Увеличение концентрации наночастиц в группе с часовой инкубацией привело к снижению продукции АФК, а с двухчасовой, наоборот, индуцировало продукцию АФК (рис. 4). Так как наночастицы способны самостоятельно генерировать АФК, увеличение содержания АФК в клетках следует рассматривать как развитие окислительного стресса в гемоцитах [29, 30]. Известно также, что поглощенные гемоцитами наночастицы могут влиять на иммунные функции, такие как фагоцитоз и продукцию АФК [31]. При этом было выявлено, что фагоцитоз чужеродных частиц вызывает увеличение продукции АФК [32]. Основным источником АФК являются митохондрии [33]. Продукция АФК гемоцитами является важной защитной функцией врожденного иммунитета двустворчатых. Попадая в клетку, наночастицы способны деполяризовать митохондриальную мембрану и нарушать ее функции [29]. В ответ на такое воздействие митохондрии увеличивают продукцию АФК, вызывая окислительный стресс [34]. Как известно, фагоцитоз является энергозатратным процессом, и это тоже может являться причиной генерации АФК [35]. Ранее исследование влияния наночастиц сажи на гемоциты мидии *M. galloprovincialis* в условиях *in vitro* в течение 0.5–4 ч (1–10 мкг/мл) также показало увеличение продукции АФК в клетке [23]. А в другом исследовании того же автора, посвященном влиянию наночастиц TiO₂ и SiO₂ на гемоциты мидии, наоборот, не выявлено значительного токсического воздействия на клетку [36]. При воздействии наночастиц TiO₂ на гемоциты мидии было отмечено существенное увеличение продукции АФК

и снижение мембранного потенциала митохондрий, которые наблюдаются при воздействии максимальных концентраций [35].

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что токсичность наночастиц в основном зависела от их концентрации и времени воздействия. Результаты показали, что острый токсический эффект возникал при концентрации 3 мг/мл, при которой гибель клеток последовала уже в результате часовой инкубации. В группах 1.1, 1.2 и 1.3 с часовой инкубацией наблюдалось снижение продукции АФК, а в группах 2.1, 2.2 и 2.3 с двухчасовой инкубацией, напротив, ее увеличение, что может говорить о механизмах адаптации клеток к стрессу. Специфического ответа клеток при воздействии наночастиц в концентрациях 0.03 и 0.3 мг/мл не наблюдалось, что допускает использование таких концентраций в водной среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Звягинцев А. Ю., Полтаруха О. П., Масленников С. И.* Обрастание морских систем технического водоснабжения и анализ методов защиты от обрастания в водоводах (аналитический обзор) // *Вода: химия и экология*. 2015. № 1. С. 30–51. EDN TWNISJ.
2. *Абачараев М. М., Абачараев И. М.* Перспективные разработки по борьбе с морским обрастанием // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. 2011. № 3. С. 7–9. EDN ONJAIF.
3. *Звягинцев А. Ю.* Морское обрастание в северо-западной части Тихого океана. 2005. 432 с.
4. *Nurioglu A. G., Esteves A. C. C., de With G.* Non-toxic, non-biocide-release antifouling coatings based on molecular structure design for marine applications // *Journal of Materials Chemistry B*. 2015. Vol. 3, iss. 32. С. 6547–6570. doi:10.1039/C5TB00232J
5. Comparative Toxicity of “Tin Free” Self-Polishing Copolymer Antifouling Paints and Their Inhibitory Effects on Larval Development of a Non-Target Organism / *J. Castritsi-Catharios [et al.] // Materials Sciences and Applications*. 2014. Vol. 5. P. 158–169. doi:10.4236/msa.2014.53020
6. *Meador J. P.* Predicting the fate and effects of tributyltin in marine systems // *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. New York : Springer, 2000. Vol. 166. P. 1–48.
7. Acoustic methods for biofouling control: A review / *M. Legg [et al.] // Ocean Engineering*. 2015. Vol. 103. P. 237–247. doi:10.1016/j.oceaneng.2015.04.070
8. A study of the bactericidal, anti-biofouling, cytotoxic and antioxidant properties of actinobacterially synthesised silver nanoparticles / *T. Shanmugasundaram [et al.] // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2013. Vol. 111. P. 680–687. doi:10.1016/j.colsurfb.2013.06.045
9. Закономерности формирования антимикробных микро/нанокмозитов при окислении биметаллических наночастиц Al/Zn / *А. С. Ложкомоев [и др.] // Журнал физической химии*. 2018. Т. 92, № 12. С. 1958–1962. EDN YMNDTV. doi:10.1134/S0044453718120270
10. *Palza H.* Antimicrobial polymers with metal nanoparticles // *International Journal of Molecular Sciences*. 2015. Vol. 16, iss. 1. P. 2099–2116. doi:10.3390/ijms16012099

11. The effect of nanoparticle size on in vivo pharmacokinetics and cellular interaction / N. Hoshyar [et al.] // *Nanomedicine*. 2016. Vol. 11, iss. 6. P. 673–692. doi:10.2217/nmm.16.5
12. Toxicity of copper oxide nanoparticles in the blue mussel, *Mytilus edulis*: a redox proteomic investigation / W. Hu [et al.] // *Chemosphere*. 2014. Vol. 108. P. 289–299. doi:10.1016/j.chemosphere.2014.01.054
13. Comparison of the abilities of ambient and manufactured nanoparticles to induce cellular toxicity according to an oxidative stress paradigm / T. Xia [et al.] // *Nano Letters*. 2006. Vol. 6, iss. 8. P. 1794–1807. doi:10.1021/nl061025k
14. The apoptotic effect of nanosilver is mediated by a ROS-and JNK-dependent mechanism involving the mitochondrial pathway in NIH3T3 cells / Y.-H. Hsin [et al.] // *Toxicology letters*. 2008. Vol. 179, iss. 3. P. 130–139. doi:10.1016/j.toxlet.2008.04.015
15. Evaluation of the toxicity of nanostructural aluminium oxyhydroxide with the help of hydrobionts / N. V. Svarovskaya [et al.] // *Chemistry for Sustainable Development*. 2013. Vol. 21, iss. 4. P. 411–414. URL: https://sibran.ru/en/journals/issue.php?ID=150645&ARTICLE_ID=150654 (date of access: 18.02.2023).
16. Trophic transfer of TiO₂ nanoparticles from daphnia to zebrafish in a simplified freshwater food chain / X. Zhu [et al.] // *Chemosphere*. 2010. Vol. 79, iss. 9. P. 928–933. doi:10.1016/j.chemosphere.2010.03.022
17. Impacts of metal oxide nanoparticles on marine phytoplankton / R. J. Miller [et al.] // *Environmental science and technology*. 2010. Vol. 44, iss. 19. P. 7329–7334. doi:10.1021/es100247x
18. The embryotoxicity of ZnO nanoparticles to marine medaka, *Oryzias melastigma* / Y. Cong [et al.] // *Aquatic Toxicology*. 2017. Vol. 185. P. 11–18. doi:10.1016/j.aquatox.2017.01.006
19. Antimicrobial effects of TiO₂ and Ag₂O nanoparticles against drug-resistant bacteria and leishmania parasites / A. M. Allahverdiyev [et al.] // *Future Microbiology*. 2011. Vol. 6, iss. 8. P. 933–940. doi:10.2217/fmb.11.78
20. Mosunov A. A., Evstigneev V. P. Nanoparticles in marine antifouling coatings: a case study // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2094, iss. 2. 022041. doi:10.1088/1742-6596/2094/2/022041
21. Electroexplosive synthesis of composite ZnO/ZnFe₂O₄/Zn nanoparticles with photocatalytic and antibacterial activity / O. Bakina [et al.] // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2022. Vol. 152. 107076. doi:10.1016/j.mssp.2022.107076
22. Immunotoxicity of carbon black nanoparticles to blue mussel hemocytes / L. Canesi [et al.] // *Environment International*. 2008. Vol. 34, iss. 8. P. 1114–1119. doi:10.1016/j.envint.2008.04.002
23. Анализ клеточного цикла и морфофункциональных параметров гемоцитов *Mytilus galloprovincialis* Lam., 1819 (Bivalvia) в прибрежных экосистемах с различной антропогенной нагрузкой / А. Ю. Андреева [и др.] // *Биология внутренних вод*. 2019. № 4-2. С. 74–81. EDN TUBWWR. doi:10.1134/S0320965219060032
24. Bacteria–hemocyte interactions and phagocytosis in marine bivalves / L. Canesi [et al.] // *Microscopy research and technique*. 2002. Vol. 57, iss. 6. P. 469–476. doi:10.1002/jemt.10100
25. Koutsogiannaki S., Kaloyianni M. Signaling molecules involved in immune responses in mussels // *Invertebrate Survival Journal*. 2010. Vol. 7, iss. 1. P. 11–21. URL: <https://www.isj.unimore.it/index.php/ISJ/article/view/204/119> (date of access: 18.02.2023).

26. Tiscar P. G., Mosca F. Defense mechanisms in farmed marine molluscs // *Veterinary Research Communications*. 2004. Vol. 28, suppl. 1. P. 57–62. doi:10.1023/B:VERC.0000045379.78547.23
27. Jovanović B., Palić D. Immunotoxicology of non-functionalized engineered nanoparticles in aquatic organisms with special emphasis on fish – Review of current knowledge, gap identification, and call for further research // *Aquatic Toxicology*. 2012. Vol. 118. P. 141–151. doi:10.1016/j.aquatox.2012.04.005
28. Chalew T. E. A., Galloway J. F., Graczyk T. K. Pilot study on effects of nanoparticle exposure on *Crassostrea virginica* hemocyte phagocytosis // *Marine Pollution Bulletin*. 2012. Vol. 64, iss. 10. P. 2251–2253. doi:10.1016/j.marpolbul.2012.06.026
29. The role of reactive oxygen species (ROS) in the biological activities of metallic nanoparticles / A. A. Dayem [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. 2017. Vol. 18, iss. 1. P. 120. doi:10.3390/ijms18010120
30. Sokolova I. M. Energy-limited tolerance to stress as a conceptual framework to integrate the effects of multiple stressors // *Integrative and Comparative Biology*. 2013. Vol. 53, iss. 4. P. 597–608. doi:10.1093/icb/ict028
31. In vivo effects of n-TiO₂ on digestive gland and immune function of the marine bivalve *Mytilus galloprovincialis* / C. Barmo [et al.] // *Aquatic Toxicology*. 2013. Vol. 132–133. P. 9–18. doi:10.1016/j.aquatox.2013.01.014
32. Hemocytes of the carpet shell clam (*Ruditapes decussatus*) and the Manila clam (*Ruditapes philippinarum*): current knowledge and future prospects / L. Donaghy [et al.] // *Aquaculture*. 2009. Vol. 297, iss. 1–4. P. 10–24. doi:10.1016/j.aquaculture.2009.09.003
33. Starkov A. A. The role of mitochondria in reactive oxygen species metabolism and signaling // *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2008. Vol. 1147, iss. 1. P. 37–52. doi:10.1196/annals.1427.015
34. Differential in vivo hemocyte responses to nano titanium dioxide in mussels: Effects of particle size / T. Wang [et al.] // *Aquatic Toxicology*. 2019. Vol. 212. P. 28–36. doi:10.1016/j.aquatox.2019.04.012
35. Diversity and environmental adaptation of phagocytic cell metabolism / L. C. Davies [et al.] // *Journal of Leukocyte Biology*. 2019. Vol. 105, iss. 1. P. 37–48. doi.org/10.1002/JLB.4RI0518-195R
36. In vitro effects of suspensions of selected nanoparticles (C60 fullerene, TiO₂, SiO₂) on *Mytilus* hemocytes / L. Canesi [et al.] // *Aquatic Toxicology*. 2010. Vol. 96, iss. 2. P. 151–158. doi:10.1016/j.aquatox.2009.10.017

Поступила 9.08.2022 г.; одобрена после рецензирования 5.12.2022 г.;
принята к публикации 01.02.2023 г.; опубликована 24.03.2023 г.

Об авторах:

Подольская Мария Сергеевна, младший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), **ORCID ID: 0000-0001-8185-3985**, *podolskaya_m99@bk.ru*

Ткачук Анастасия Александровна, младший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), **ORCID ID: 0000-0002-4017-7164**, *aatkachuk86@gmail.com*

Андреева Александра Юрьевна, руководитель лаборатории экологической иммунологии гидробионтов, Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), ведущий научный сотрудник, кандидат биологических наук **ORCID ID: 0000-0001-7845-0165**, **ResearcherID: Z-6151-2019**, **Scopus AuthorID: 57191916535**, *andreevaal@gmail.com*

Кладченко Екатерина Сергеевна, научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), **ORCID ID: 0000-0001-9476-6573**, **ResearcherID: U-7749-2019**, **Scopus AuthorID: 57205560752**, *Kladchenko_Ekaterina@bk.ru*

Челебиева Элина Сергеевна, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-7662-2573**, **ResearcherID: H-3359-2014**, **Scopus AuthorID: 56549997100**, *elina.chelebieva@gmail.com*

Мосунов Андрей Алексеевич, ведущий научный сотрудник, Севастопольский государственный университет (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1390-5832**, **ResearcherID: R-5570-2016**, **Scopus AuthorID: 36802573200**, *aamosunov@sevsu.ru*

Заявленный вклад авторов:

Подольская Мария Сергеевна – подготовка текста статьи, проведение экспериментальных исследований, качественный анализ данных и интерпретация, обработка и описание результатов исследования, обзор литературы по теме исследования

Ткачук Анастасия Александровна – формализованный анализ данных, обзор литературы по теме исследования, проведение экспериментальных исследований, подготовка графического материала, редактирование текста

Андреева Александра Юрьевна – формулировка и постановка задачи, разработка концепции, разработка методики проведения экспериментальных исследований, формулирование выводов, редактирование текста

Кладченко Екатерина Сергеевна – подготовка графических материалов, проведение экспериментальных исследований, редактирование текста

Челебиева Элина Сергеевна – проведение экспериментальных исследований, редактирование текста

Мосунов Андрей Алексеевич – синтез наночастиц, редактирование текста

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Термопрофилемер для измерения вертикального распределения температуры в верхнем 100-метровом слое моря и его испытания в Арктическом бассейне

П. В. Гайский *, И. Е. Козлов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: gaysky@inbox.ru*

Аннотация

Описаны технические и методические аспекты разработки экспериментального образца распределенного датчика температуры – термопрофилемера. Измеритель создан для исследований термической приповерхностной структуры морской среды в Арктике, включая контроль вертикальных профилей температуры по глубине, обнаружение термоклина и определение параметров внутренних волн. Длина термочувствительной части датчика, построенной на базе непрерывных пространственно-модулированных проводников, составляет 48 м. Пространственно-осредненное разрешение – 1.5 м. Датчик может использоваться в статическом и динамическом режимах измерений, включая зондирование и буксировку. Контроль заглубления измерительной части осуществляется с помощью гидростатических датчиков давления, расположенных на концах датчика. Специализированное программное обеспечение измерителя осуществляет отображение измерительной информации в виде мгновенных профилей температуры, а также динамики изолиний температуры с привязкой к пространству и времени в телеметрическом режиме и при постобработке. По пространственному положению и смещению рассчитанных изолиний по глубине во времени обеспечивается автоматический контроль местонахождения термоклина, амплитуды и периода внутренних волн. Экспериментальный образец измерителя использовался в арктических исследованиях 2021 г.

Ключевые слова: распределенный датчик температуры, термопрофилемер, изотерма, теплозапас, термоклин, внутренние волны, поле температуры, теплообмен, термокоса

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0004 (создание термопрофилемера) и гранта РФФИ № 21-17-00278 (выполнение натурных измерений внутренних волн в Арктике).

© Гайский П. В., Козлов И. Е., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Гайский П. В., Козлов И. Е. Термопрофилемер для измерения вертикального распределения температуры в верхнем 100-метровом слое моря и его испытания в Арктическом бассейне // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 137–145. EDN CWVFVA. doi:10.29039/2413-5577-2021-3-137-145

Thermoprofilemeter for Measuring the Vertical Temperature Distribution in the Upper 100-Meter Layer of the Sea and its Testing in the Arctic Basin

P. V. Gaisky *, I. E. Kozlov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

** e-mail: gaysky@inbox.ru*

Abstract

The paper describes the technical and methodological aspects of development of an experimental sample of a distributed temperature sensor. The thermoprofilemeter is created for Arctic studies of the thermal near-surface structure of marine environment, including vertical temperature profiles, detection of thermocline and internal waves. The temperature-sensitive part of the sensor built on the basis of continuous spatially modulated conductors measures 48 m. The spatial-averaged resolution is 1.5 m. The sensor can be used in static and dynamic measurement modes, including sounding and towing. Control of the depth of the measuring part is carried out using hydrostatic pressure sensors located at the ends of the sensor. The specialized software provides the display with measuring information in the form of instantaneous temperature profiles as well as in the form of the dynamics of temperature isolines with reference to depth and time, in telemetric mode and during post-processing. The calculated isolines provide automatic control of the spatial vertical displacement of the thermocline, and the amplitude and period of internal waves. An experimental sample of the device was used in Arctic studies in 2021.

Keywords: distributed temperature sensor, thermoprofilemeter, isotherm, heat storage, thermocline, internal waves, temperature field, heat exchange, termistor chain.

Acknowledgements: The research was performed under state assignment on topic no. 0555-2021-0004 (creation of the thermoprofilemeter) and RSF grant no. 21-17-00278 (*in situ* measurements of internal waves in the Arctic Ocean).

For citation: Gaisky, P.V. and Kozlov, I.E., 2023. Thermoprofilemeter for Measuring the Vertical Temperature Distribution in the Upper 100-Meter Layer of the Sea and its Testing in the Arctic Basin. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 137–145. EDN CWVFVA. doi:10.29039/2413-5577-2021-3-137-145

Введение

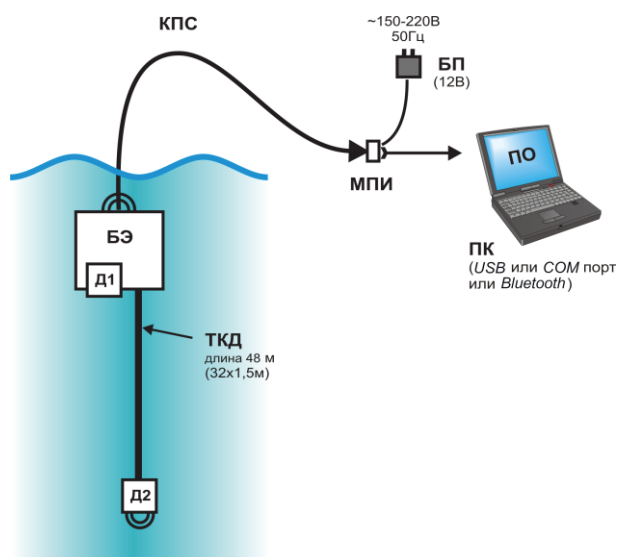
Исследования динамики температурных изменений в водной среде Арктического региона приобретают все большую актуальность вследствие активного освоения региона и развития климатических аномалий [1, 2]. Наряду с задачами контроля теплозапаса и процессов теплообмена в водной среде возникает необходимость качественного изучения переноса, распределения и динамики перемешивания водных масс с учетом течений, внутренних волн

[3–7] и других явлений гидрологической, метеорологической, геологической и антропогенной природы.

Одним из инструментов таких исследований являются распределенные датчики температуры – пространственно дискретные термокосы [8–10] и распределенные термопрофилемеры [11, 12]. При повышенных требованиях к точности и быстродействию измерений в ряде случаев термопрофилемеры являются предпочтительными. Работа термопрофилемеров основана на опросе аналоговых проводниковых датчиков. Следовательно, при соответствующей метрологической градуировке и реализации электронных схем первичного измерительного преобразователя, в отличие от серийных цифровых аналогов, термопрофилемеры могут успешно работать в широком диапазоне температур. Конструктивно термопрофилемеры могут иметь адаптивное пространственное разрешение. Опрос всех распределенных датчиков в термопрофилемере осуществляется одновременно. Опыт использования термопрофилемеров в экспедиционных исследованиях показал их надежность как в телеметрическом применении, так и в длительных автономных постановках. Поскольку электроника измерителя рассчитана на рабочие диапазоны температуры от -40 до $+60$ °С, а механические нагрузки на термочувствительный кабель-датчик ограничиваются его конкретным техническим исполнением (грузонесущей защиты и оболочки), то термопрофилемер может вполне успешно применяться в сезонных рабочих условиях арктических исследований.

Аппаратура

Поскольку основной целью измерений проектируемого датчика являются температурные процессы в Арктическом регионе, происходящие на глубинах до 100–150 м, то идеальным распределенным измерителем вертикальных мгновенных профилей температуры был бы датчик соответствующей длины. Был изготовлен экспериментальный измеритель длиной 48 м из 32 распределенных участков по 1.5 м. Контроль внутренних волн на границе обнаруженного термоклина с залеганием глубже 50 м предполагается осуществлять с использованием измерителя в буксируемо-зондирующем режиме (за счет запаса кабель-троса). При условии прямолинейности тела датчика его ориентация по вертикали и привязка температурных измерений по глубине контролируются с помощью датчиков гидростатического давления, расположенных в крайних верхней и нижней точках измерителя. При изготовлении измерительных каналов давления использовались датчики *Honeywell MLH300PSL06A*. При изготовлении температурной сенсорной части использовались медные проводники (провод ПЭВТЛ-2 \varnothing 0.18 мм), уложенные по ортогональным функциям [11, 12] в защитной полиамидной трубке \varnothing 6–10 мм с параллельным внутренним грузонесущим стальным тросом. Погружной микроконтроллерный блок электроники обеспечивает коммутацию каналов и аналого-цифровое преобразование измерительной информации с передачей первичных кадров данных через кабель-трос на бортовое компьютерное устройство по стандартному последовательному интерфейсу RS232/485. Корпус электронного блока выполнен из нержавеющей стали и полиацетали (POM-C). Структурная схема и общий вид измерителя представлены на рис. 1 и 2 соответственно.



Р и с . 1 . Структурная схема измерителя
 F i g . 1 . Device block diagram



Р и с . 2 . Общий вид измерителя
 F i g . 2 . General view of the device

- Основной состав измерителя включает:
- термочувствительный погружной кабель-датчик (ТКД);
 - погружной блок электроники (БЭ);
 - встроенные в БЭ и ТКД датчики гидростатического давления (Д1 и Д2), рассчитанные для глубин до 200 м (показания до 100 м);
 - соединительный кабель питания и связи (КПС);



Р и с . 3 . Вид и подключение модуля преобразования интерфейсов (МПИ)

F i g . 3 . Interface conversion module view and connection

- модуль преобразования интерфейсов (МПИ);
- внешний блок преобразования и стабилизации питания из ~ 220 В в 12 В (БП);
- специализированное программное обеспечение для первичной регистрации и обработки данных измерителя для персонального компьютера ПК (ПО).

Для обеспечения универсальности подключения измерителя к компьютерному устройству был разработан мультиинтерфейсный модуль (рис. 3), который обеспечивает возможность использования стандартных портов *COM*, *USB* и *Bluetooth* (через виртуальный *COM*) на выбор.

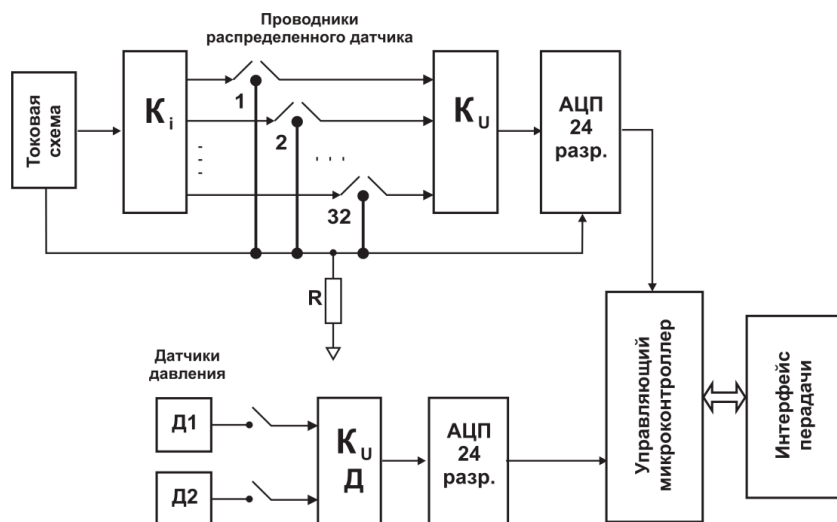
Результаты

Функциональная схема разработанного электронного модуля измерителя представлена на рис. 4. Измерительные каналы прибора опрашиваются в коммутационном режиме. Для проводников распределенного датчика используется параллельная токово-потенциальная коммутация (K_i и K_u). Датчики давления опрашиваются отдельным коммутатором ($K_uД$). Аналого-цифровое преобразование осуществляется с помощью 24-разрядного сигма-дельта преобразователя фирмы *Analog Devices*.

Функциональная схема МПИ представлена на рис. 5. В этом модуле используются готовые решения преобразования интерфейсов, стандартные драйверы и доступные системные возможности настройки и подключения внешних устройств к ПК.

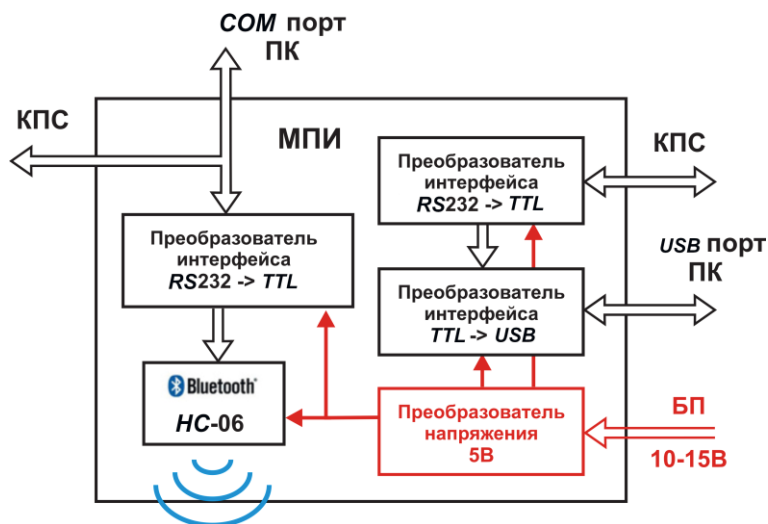
Специализированное программное обеспечение для регистрации, обработки и отображения данных измерителя¹⁾ функционирует в операционных системах *MS Windows*.

¹⁾ Программа для регистрации и обработки измерительных данных термопрофилемеров «THERMOPROF» / П. В. Гайский ; МГИ. Электрон. дан. Севастополь, 2022. № гос. регистрации 2022611315.



Р и с . 4. Функциональная схема блока электроники (БЭ) измерителя

F i g . 4. Functional diagram of the device electronics unit



Р и с . 5. Функциональная схема модуля преобразования интерфейсов (МПИ)

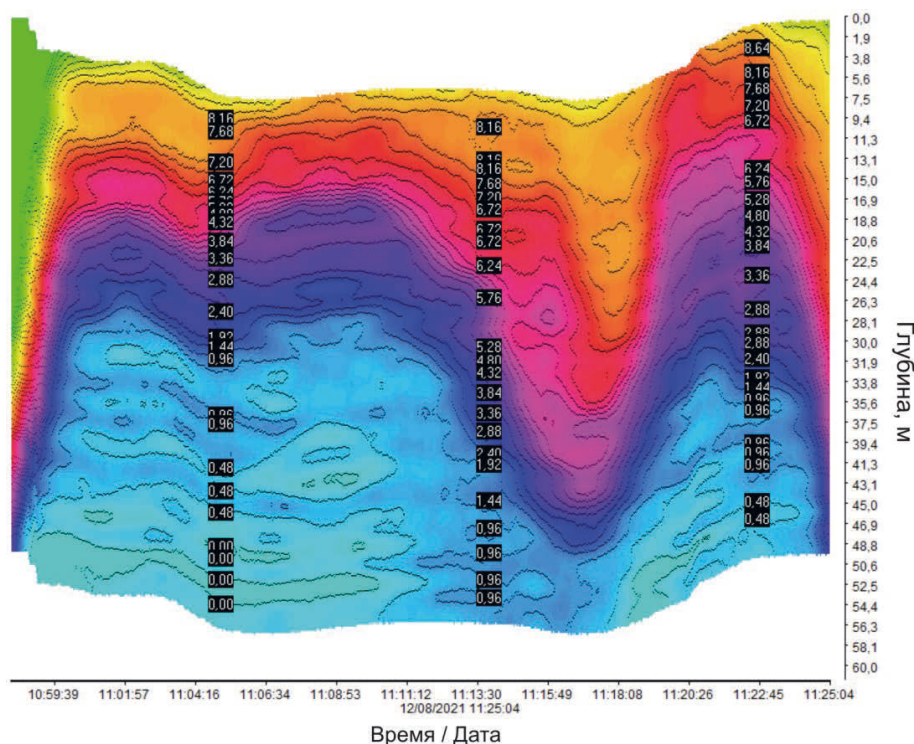
F i g . 5. Interface conversion module functional diagram

По результатам метрологических поверок, а также исходя из установленных техническим заданием требований были сформулированы технические и метрологические характеристики экспериментального образца прибора:

- длина ТКД – 48 м;
- количество участков – 32 шт.;
- осредненное пространственное разрешение ТКД – 1.5 м;
- период измерения профиля и ориентации по глубине (частота опроса) – 2 с;

- погрешность измерения осредненной на участке ТКД температуры – ± 0.1 °С в диапазоне от 0 до +25 °С;
- погрешность измерения глубины в точках установки датчиков давления (Д1 и Д2) – 0.1 дБа (0.1 м) в диапазоне от 0 до 100 м;
- цифровое разрешение по температуре – 0.0007 °С;
- цифровое разрешение по давлению – 0.00008 дБа;
- средняя инерционность ТКД в жидкости – 30 с;
- энергопитание погружной части (ТКД и БЭ) по КПС – постоянное напряжение от 10 до 15 В (до 2 Вт);
- длина КПС – 40÷100 м;
- масса измерителя (ТКД, БЭ, КПС, МПИ, БП) – до 15 кг;
- внешние размеры измерителя в комплекте для упаковки – 0.6 × 0.6 × 0.2 м.

На рис. 6 представлен фрагмент записей измерений, проведенных в глубинной акватории во время арктической экспедиции [13]. Результат отображается в виде изолиний температуры вертикального профиля с привязкой к глубине и времени. Разработанный термопрофилемер использовался в буксире-зондирующем режиме с борта судна. На рисунке отчетливо видны колебания изотермических поверхностей. Наиболее выражено колебание изотерм 4 и 6 °С с 11:10 до 11:20 высотой около 30 м в слое 10–50 м, которое,



Р и с . 6 . Пример записи измерений датчиком в Арктике в буксире-зондирующем режиме в изолиниях температуры

Fig. 6. Example of measurement recording by a sensor in the Arctic in towed-sounding mode in temperature isolines

согласно предположению авторов, ассоциируется с прохождением короткопериодной внутренней волны в районе измерений. В процессе этого эксперимента судно переместилось на 1 км со средней скоростью дрейфа 66.7 см/с. Максимальное зондирование по глубине по данным датчиков давления, расположенных на концах измерителя, осуществлялось до +7 м к длине термопрофилемера. Измерительная система в телеметрическом режиме отслеживала заглубление термопрофилемера и положение термоклина, а алгоритмы контроля пространственных смещений изолиний – амплитуду и период внутренней волны. В то же время на картинке хорошо видна тепловая инерционность распределенного датчика в первые 20 секунд после погружения. Очевидно, что при оценке данных наблюдений в динамических режимах и при наличии градиентов ее необходимо учитывать. Для объективного анализа длин обнаруживаемых внутренних волн необходим одновременный контроль скорости заборных течений.

Заключение

Разработанный экспериментальный образец измерителя прошел первичные натурные испытания и обеспечил исследователей в экспедиционных работах качественной оперативной информацией. Дальнейшая модернизация конструкции измерителя позволит увеличить механическую нагрузочную способность кабеля-датчика и общую надежность. С учетом технической модификации рассматриваются дополнительные методы применения термопрофилемеров для арктических исследований, включая автономную установку и возможности длительных измерений в буксируемом режиме.

Результаты измерений, полученные с помощью термопрофилемеров, характеризуются большей точностью и меньшей дискретностью (как временной, так и пространственной) по сравнению с распространенными термоподвесками, выполненными в виде гирлянды цифровых датчиков температуры. Специализированные программные алгоритмы обеспечивают оперативность в наглядном отображении телеметрической измерительной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изменение гидрологических условий в Баренцевом море как индикатор климатических трендов в евразийской Арктике в XXI веке / В. В. Иванов [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2022. № 1. С. 13–25. EDN TKYDXO.
2. Состояние и перспективы развития системы мониторинга гидрологических условий акватории Северного Ледовитого океана / И. М. Ашик [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68, № 1. С. 8–25. EDN RGTQLD. doi:10.30758/0555-2648-2022-68-1-8-25
3. Букатов А. А., Соловей Н. М., Павленко Е. А. Свободные короткопериодные внутренние волны в арктических морях России // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 6. С. 645–658. EDN PJTDAA. doi:10.22449/0233-7584-2021-6-645-658
4. Свержун Е. И., Зимин А. В., Жегулин Г. В. Наблюдения внутренних волн второй моды в Белом и Баренцевом морях // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 2. С. 185–195. EDN ZBAISA. doi:10.22449/0233-7584-2022-2-185-195
5. Морозов Е. Г., Пака В. Т. Внутренние волны в высокоширотном бассейне // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 709–715. EDN MVSGVV.

6. Характеристики поля короткопериодных внутренних волн в Карском море по данным спутниковых радиолокационных измерений / И. Е. Козлов [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 44–59. EDN UDEYRL. doi:10.7868/S0205961415040053
7. Районы генерации нелинейных внутренних волн в Баренцевом, Карском и Белом морях по данным спутниковых РСА измерений / И. Е. Козлов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 4. С. 338–345. EDN TJELGP.
8. Термокосы ЮО ИО РАН: конструкция, методика и результаты метрологического исследования датчиков / В. В. Очередник [и др.]. Океанология. 2018. Т. 58, № 5. С. 719–730. EDN XWVHWH. doi:10.1134/S003015741805009X
9. Николаев Н. И., Васильева Н. В., Николаева И. В. Разработка устройства для удаленного мониторинга температурной среды «термокоса» // Наука и бизнес: пути развития. 2021. № 11. С. 17–23. EDN НУИЈСТ.
10. Толстошеев А. П., Лунев Е. Г., Мотыжев С. В. Анализ результатов натурных экспериментов с термопрофилирующими дрейфующими буями в Черном море и других районах мирового океана // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 5. С. 9–32. EDN TECAWR.
11. Гайский В. А., Гайский П. В. Распределенные термопрофилемеры и их возможности в океанографических исследованиях // Морской гидрофизический журнал. 1999. № 6. С. 46–76.
12. Гайский В. А., Гайский П. В. Использование распределенных датчиков для температурных измерений в море. Севастополь : ИПТС. 2018. 222 с. doi:10.33075/978-5-6040795-4-6
13. Исследование внутренних волн большой амплитуды в проливе Карские ворота в августе 2021 г. / И. О. Копышов [и др.] // Морские исследования и образование: сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Тверь, 25–29 октября 2021 года. Тверь : ООО «ПолиПРЕСС», 2021. Т. 3. С. 238–241. EDN UCQRPY.

Поступила 18.08.2022 г.; одобрена после рецензирования 11.10.2022 г.; принята к публикации 01.02.2023 г.; опубликована 24.03.2023 г.

Об авторах:

Гайский Павел Витальевич, заведующий лабораторией инновационного морского приборостроения, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат технических наук, **Scopus Author ID: 7801588003**, **SPIN-код: 7789-0658**, *gaysky@inbox.ru*

Козлов Игорь Евгеньевич, заведующий лабораторией морских полярных исследований, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-6378-8956**, **ResearcherID: G-1103-2014**, **Scopus Author ID: 49963767500**; **ID РИНЦ: 705937**, *ik@mhi-ras.ru*

Заявленный вклад авторов:

Гайский Павел Витальевич – разработка и изготовление измерителя, разработка программного обеспечения

Козлов Игорь Евгеньевич – испытание измерителя в арктической экспедиции, анализ измерительных данных

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Морской гидрофизический институт РАН

Подписку на очередные номера журнала «Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон моря» можно оформить по Интернет каталогу «Пресса по подписке» (индекс 93635).

Адрес редакции:

299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт
РАН» Тел.: +7 (8692) 54-01-80, 54-57-16

Сайт журнала «Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон
моря»: <http://ecological-safety.ru>

E-mail: ecology-safety@mhi-ras.ru

Ответственный за номер Ю. Н. Горячкин, В. И. Рябушко

Редакторы: Н. А. Конопляникова, Н. Б. Мороз

Компьютерная верстка: Т. В. Хмара

Перевод: Н. А. Конопляникова

Информационная поддержка сайта журнала: А. О. Конопляников

Дизайн обложки: О. В. Домнина

Подписано в печать 1.02.2023 г. Дата выхода в свет 24.03.2023 г. Формат 70 × 108¹/₁₆.

Цифровая печать. Усл. печ. л. 6,4. Усл. кр.-отт. 7,0. Уч.-изд. л. 6,85.

Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ИП Копыльцов Павел Иванович. ИНН 366411965235
394052, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Маршала Неделина, дом 27, кв. 56